

Stahldrahtseile für Krane

Probleme und Lösungen

von Dipl.-Ing. Roland Verreet

1	Das Drahtseil als mehrfach redundantes Maschinenelement	2
2	Problem: Lokale Konzentrationen von Drahtbrüchen	4
3	Problem: Innere Drahtbrüche	5
3.1	Problem: Innere Drahtbrüche in einem 6-litzigen Seil mit Stahleinlage	6
3.2	Lösung: 8-litzige Seile mit einer Kunststoffzwischenlage	6
4	Problem: Innere Drahtbrüche in konventionellen drehungsarmen Seilen	8
4.1	Intermezzo: Drehungsarme und drehungsfreie Drahtseile	11
4.2	Lösung: Drehungsfreie Spezialdrahtseile mit einem verdichteten Seilkern und verdichteten Außenlitzen	12
5	Die magnetinduktive Drahtseilprüfung	12
6	Problem: Korrosion von Stahldrahtseilen	13
6.1	Lösung 1: Verzinkte Drähte und kunststoffumhüllte Stahleinlagen	14
6.2	Lösung 2: Regelmäßige Nachschmierung	14
7	Problem: Ungenügende Lebensdauer von Drahtseilen	15
7.1	Lösung 1: Drahtseile mit höherer Ermüdungsfestigkeit	15
7.2	Lösung 2: Optimieren Sie Ihren Seildurchmesser!	16
7.3	Lösung 3: Optimieren Sie Ihren Scheibendurchmesser!	19
7.4	Lösung 4: Vermeidung unnötiger Ermüdungsbeanspruchung	19
7.5	Lösung 5: Optimieren Sie die Zugschwellfestigkeit durch Reduzierung des Drahtseildurchmessers!	20
8	Problem: Litzenlockerungen und Korbbildungen	22
8.1	Lösung 1: Seilschmierung	25
8.2	Lösung 2: Stahlscheiben anstelle von Kunststoffscheiben	25
8.3	Lösung 3: Seilscheiben mit größeren Öffnungswinkeln	25
8.4	Lösung 4: Benutzen Sie Drahtseile mit einer Kunststoffzwischenlage!	27
8.5	Lösung 5: Vermeiden Sie zu enge Seilrillen!	27
9	Problem: Mechanische Beschädigung der Drahtseile auf der Seiltrommel	27
9.1	Lösung 1: Gerillte Seiltrommeln und eine Lebus-Spulung	28
9.2	Lösung 2: Drahtseile in Gleichschlagausführung mit verdichteten Außenlitzen	28
10	Problem: Gute Drahtseile sind teuer.	30
10.1	Lösung: Berechnen Sie die Gesamtkosten!	30

1 Das Drahtseil als mehrfach redundantes Maschinenelement

Bei der visuellen Inspektion eines Drahtseiles hat der Inspektor 10.000 Drahtbrüche gefunden. Nach seiner Meinung ist das Drahtseil noch nicht ablegereif. Könnte er recht haben?

Vor der Erfindung des Drahtseiles im Jahre 1834 waren Ketten die gebräuchlichsten Hebemittel. Ketten haben jedoch einen gewichtigen Nachteil: Ketten sind *Reihenschaltungen* von lasttragenden Elementen. Wenn nur ein einziges Kettenglied bricht (Bild 1), versagt das Gesamtsystem und die Last stürzt ab.

Drahtseile sind *Parallelschaltungen* von lasttragenden Elementen. Wenn ein Element eines Drahtseiles bricht, wird die Bruchkraft des Seiles in der Regel um weniger als 1% geschwächt (Bild 2), und auch diese Schwächung betrifft nur eine kurze Seilstrecke.

Ein Drahtseil ist ein *mehrfach redundantes System* lasttragender Elemente. In einem redundanten System sind die Elemente, die für das Funktionieren des Systems bedeutsam sind, mindestens zweifach vorhanden. So ist z. B. unser Körper in Bezug auf Hören und Sehen redundant. Wenn wir das Sehvermögen auf einem Auge verlieren, können wir immer noch sehen. Und wenn wir auf einem Ohr taub werden, können wir immer noch hören.

Wenn in einem Drahtseil ein Draht bricht, finden sich immer noch ungefähr 250 andere Drähte, die die Last tragen können.

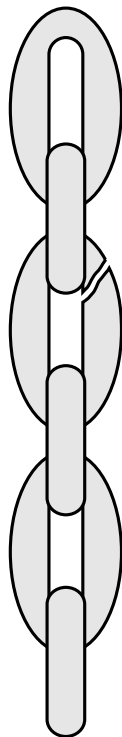


Bild 1: *Die Kette. Der Bruch eines Elementes führt zum Versagen des Gesamtsystems.*

Bild 2: *Das Drahtseil. Der Bruch eines Elementes hat praktisch keinen Effekt.*

Aber was passiert, wenn während des Einsatzes eines Drahtseiles immer mehr von diesen Drähten brechen? Wenn wir die Sehkraft auf beiden Augen verloren haben, können wir nicht mehr sehen. Und wenn wir das Hörvermögen auf beiden Ohren verloren haben, können wir nicht mehr hören. Sollte deshalb nicht auch ein Drahtseil spätestens dann versagen, wenn *jeder* seiner 250 Drähte gebrochen ist?

Nein. Es klingt unglaublich, aber ein Drahtseil kann immer noch in einem guten Zustand sein, selbst wenn *jeder* seiner Drähte *200 mal* gebrochen ist!

Bild 3 zeigt eine schematische Anordnung der 250 Drähte, aus denen unser Drahtseil aufgebaut ist. Aus Platzgründen sind lediglich 30 Drähte dargestellt. Entlang der Seillänge ist jeder einzelne der 250 Drähte einmal gebrochen. Jeder Drahtbruch stellt jedoch lediglich eine *lokale* Verringerung der Bruchkraft des Seiles dar. Einige Millimeter von seiner Bruchstelle entfernt trägt jeder Draht wieder seinen vollen Anteil an der Last.

Wenn wir eine sehr gleichmäßige Verteilung der Drahtbrüche entlang der Seillänge haben, so dass in jedem kurzen Seilstück, sozusagen in jeder Salamischeibe des Drahtseiles, nur ein Drahtbruch gefunden werden kann, wird die Bruchkraft jeder einzelnen dieser Sektionen nur um weniger als 1% geschwächt sein.

In einem Zugversuch würde dieses Drahtseil seine volle, im Katalog ausgewiesene Mindestbruchkraft erreichen, obwohl jedes einzelne seiner Elemente einmal gebrochen ist.

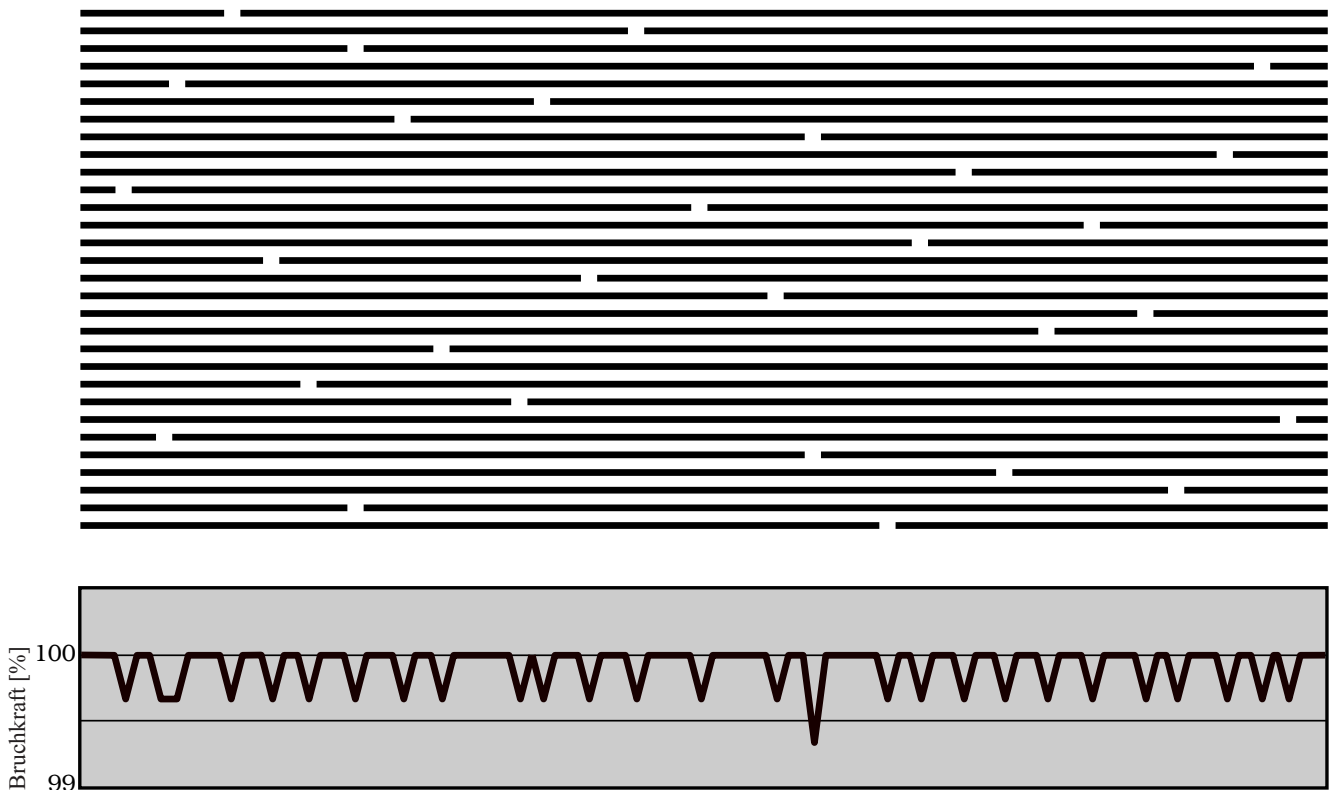


Bild 3: *Jeder Drahtbruch bewirkt nur lokal eine geringfügige Herabsetzung der Seilbruchkraft.*

Trotzdem können wir lediglich eine endliche Zahl von Drahtbrüchen pro Seillängeneinheit zulassen. Die Ablegedrahtbruchzahl ist in verschiedenen nationalen oder internationalen Normen und in den Regeln der Klassifikationsgesellschaften als eine zulässige Drahtbruchzahl bezogen auf eine Längeneinheit aufgeführt, die als Vielfaches des Seildurchmessers angegeben wird. Üblicherweise sind die Ablegedrahtbruchzahlen für eine Länge von 30 x Seilnennendurchmesser (dies entspricht ungefähr 5 Seilschlaglängen) und 6 x Seildurchmesser (dies entspricht ungefähr einer Seilschlaglänge) angegeben.

Unser Inspektor hat 10.000 Drahtbrüche gefunden, aber die Ablegedrahtbruchzahl war in keinem einzigen Seilstück der Länge 30 x d oder 6 x d erreicht. Seine Entscheidung, das Drahtseil auf dem Kran zu belassen, war somit korrekt.

Dieses Beispiel zeigt, dass unter normalen Bedingungen ein Drahtseil ein sehr sicheres und zuverlässiges Maschinenelement ist.

2 Problem: Lokale Konzentrationen von Drahtbrüchen

Einige Tage später untersucht unser Inspektor das Hubseil eines Schwesterkrans. Er findet lediglich 15 Drahtbrüche, besteht aber darauf, dass das Drahtseil abgelegt werden muß. Nachdem er auf einem baugleichen Kran 10.000 Drahtbrüche zugelassen hat, klingt diese Entscheidung ein wenig seltsam. Kann es sein, dass sich unser Inspektor diesmal irrt?

Wenn die Drahtbrüche sich auf einer sehr kurzen Seillänge konzentrieren (Bild 4), z.B. als Folge einer fehlerhaften Behandlung eines Drahtseiles oder als Folge einer mechanischen Beschädigung, addieren sich die Bruchkraftverringerungen infolge der Einzeldrahtbrüche innerhalb dieser kurzen Strecke zu einem kritischen Wert. Obwohl

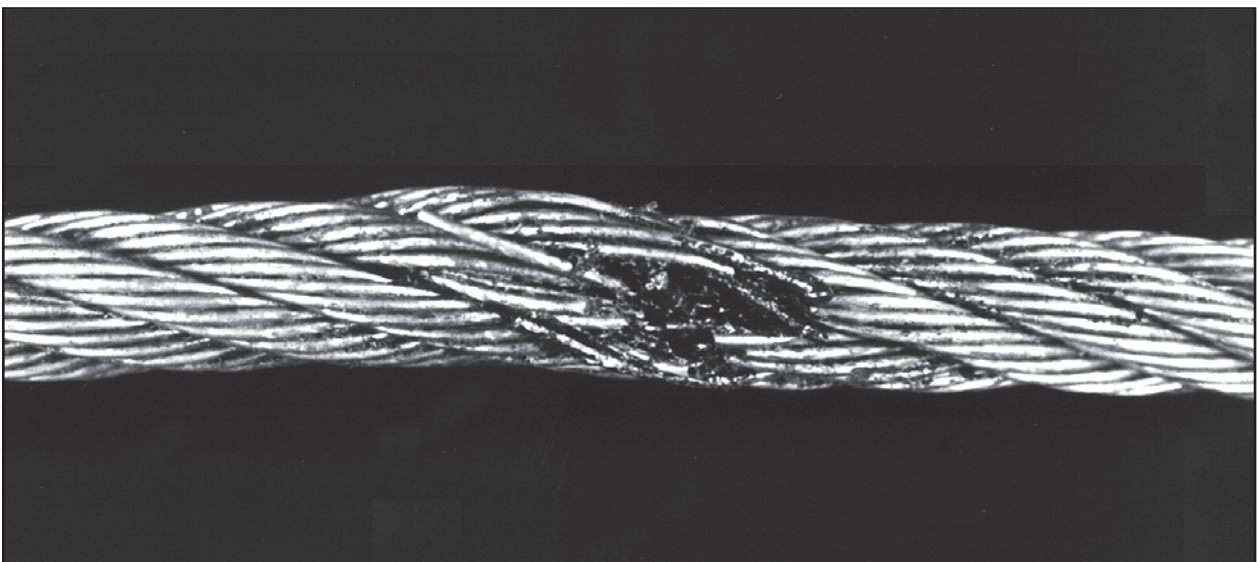


Bild 4: *Lokale Konzentration von Drahtbrüchen*

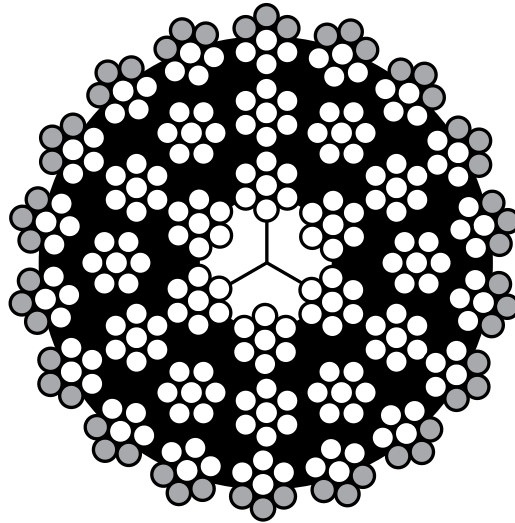


Bild 5: *Nur 20% des Metallquerschnittes (grau dargestellt) können visuell begutachtet werden.*

die übrigen 500m des Seiles frei von Drahtbrüchen sind, muß deshalb dieses Drahtseil abgelegt werden, weil 5cm in schlechtem Zustand sind.

Drahtseile mit lokalen Konzentrationen von Drahtbrüchen sind nicht betriebs sicher. Die Entscheidung unseres Inspektors, das Drahtseil abzulegen, ist korrekt.

3 Problem: Innere Drahtbrüche

Das Hubseil eines dritten, baugleichen Kranes zeigt keinen einzigen äußeren Drahtbruch. Dennoch beschließt unser Inspektor nach einer Seiluntersuchung, dass das Hubseil abgelegt werden muß. Warum?

Während einer visuellen Seilkontrolle kann lediglich der Zustand der *Außendräh*te eines Drahtseiles begutachtet werden. Der Metallquerschnitt der Aussendräh

eines Drahtseiles beträgt jedoch lediglich 40% des gesamten metallischen Querschnitts eines Drahtseiles, und nur die Hälfte der Länge dieser Außendräh

5). Dies bedeutet, dass wir bei einer visuellen Drahtseilinspektion nur den Zustand von 20% des metallischen Querschnitts eines Drahtseils begutachten können. Bezüglich der übrigen, nicht sichtbaren 80% des Metallquerschnitts können wir lediglich *hoffen*, dass sie in Ordnung sind.

**Visuelle Drahtseilinspektion =
20% Gewissheit + 80% Hoffnung**

Leider kommt es aber relativ häufig vor, dass sich die sichtbaren 20% des Metallquerschnitts in gutem Zustand präsentieren, während sich im unsichtbaren Teil des Drahtseils eine große Zahl von Drahtbrüchen versteckt. Drahtseile, die innere, aber keine äußeren Drahtbrüche aufweisen, sind *sehr gefährlich*.

3.1 Problem: Innere Drahtbrüche in einem 6-litzigen Seil mit Stahleinlage

Während der Inspektion eines Drahtseils 6x36 Warrington-Seale mit Stahleinlage (Bild 6) konnten keine äußeren Drahtbrüche gefunden werden. Nachdem das Drahtseil aber von Hand gebogen worden war, zeigte sich, dass jeder einzelne Außendraht im Inneren des Seiles gebrochen war (Bild 7).

Die Überkreuzungsstelle zwischen der Stahleinlage und der Außenlitze ist charakterisiert durch sehr hohe lokale Spannungskonzentrationen (Bild 8). Deshalb können die Außendrähte der Drahtseile an den Berührungspunkten mit der Stahleinlage brechen. Die freie Drahtlänge der gebrochenen Drähte in Bild 7 zeigt klar, dass dies hier der Fall gewesen ist.

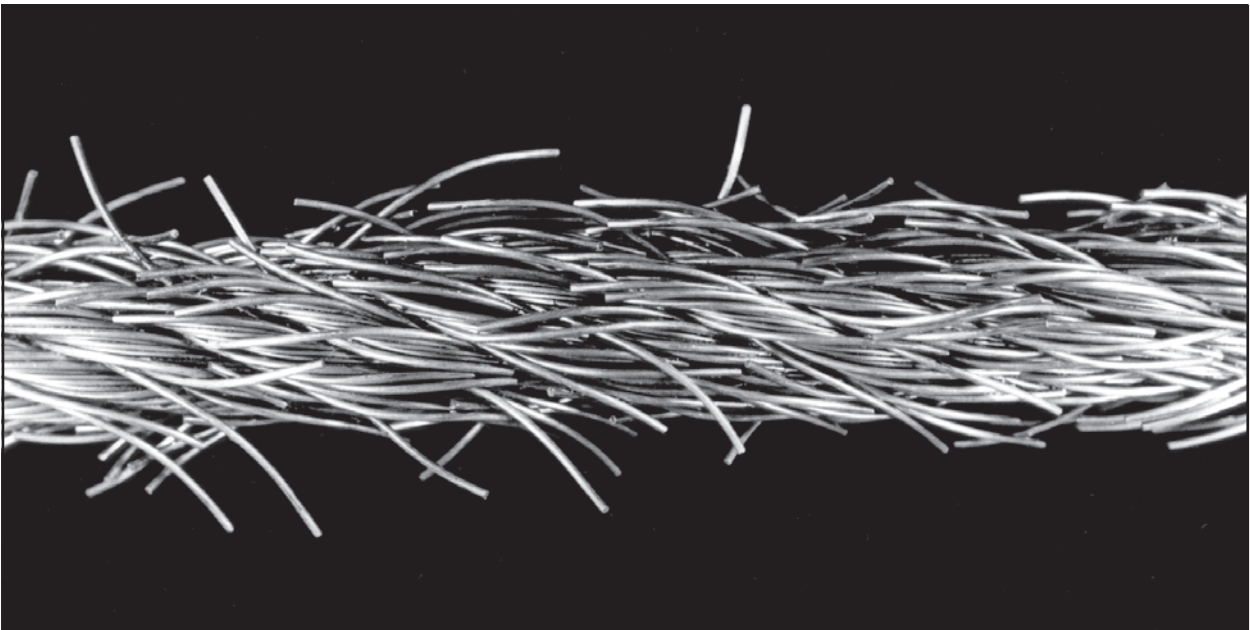


Bild 7: *Zahlreiche Drahtbrüche an den Auflagestellen der Außendrähte auf der Stahleinlage*

3.2 Lösung: 8-litzige Seile mit einer Kunststoffzwischenlage

Bild 9 zeigt den Querschnitt eines 8-litzigen Seiles mit einer Kunststoffzwischenlage zwischen der Stahleinlage und den Außenlitzen (Casar Turboplast). Die Kunststoffzwischenlage schließt nicht nur das Schmiermittel in der Stahleinlage ein und schützt diese gegen eine korrosive Umgebung, sie verhindert auch eine direkte Auflage Stahl auf Stahl zwischen den zwei Litzenlagen und verhindert somit die hohen lokalen Pressungen an den Auflagestellen zwischen der Stahleinlage und den Außenlitzen (Bild 10). Auf diese Weise hilft die Kunststoffzwischenlage erfolgreich, Drahtbrüche im Seilinnern zu vermeiden.

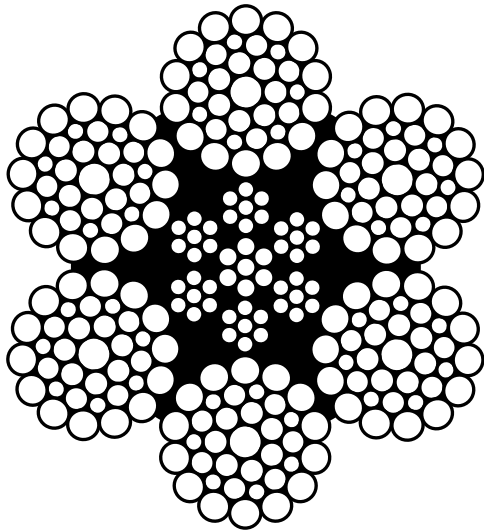


Bild. 6: *Drahtseil 6x36 Warrington-Seale mit Stahleinlage*

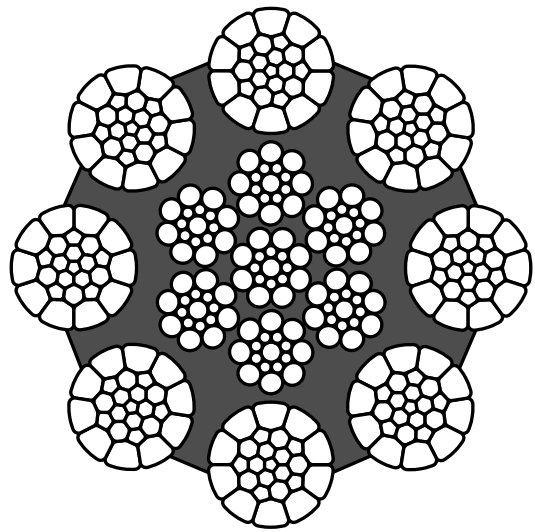


Bild 9: *8-litziges Seil mit einer Kunststofflage zwischen der Stahleinlage und den Außenlitzten (Casar Turboplast)*

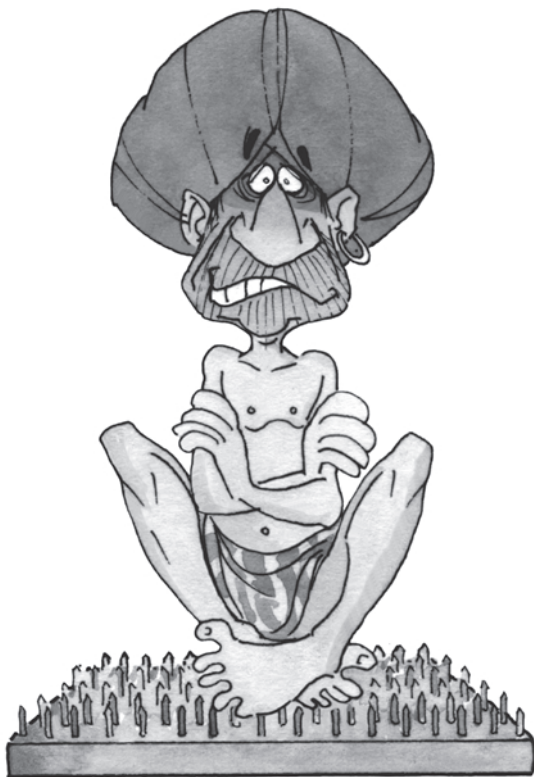


Bild 8: *Sehr hohe Spannungskonzentrationen an den Berührungspunkten mit der Stahleinlage (6x36 Warrington-Seale SES)*



Bild 10: *Die Kunststoffzwischenlage wirkt wie ein Kissen. Sie reduziert die Pressungen an den Auflagestellen und hilft so, innere Drahtbrüche zu verhindern. (Casar Turboplast).*

4 Problem: Innere Drahtbrüche in konventionellen drehungsarmen Seilen

In drehungsarmen oder drehungsfreien Drahtseilen ist die Stahleinlage entgegengesetzt zur Schlagrichtung der Außenlitzen verseilt. Aus diesem Grund sind drehungsarme oder drehungsfreie Drahtseile noch stärker der Gefahr innerer Drahtbrüche ausgesetzt als 6- oder 8-litzige Drahtseile.

Bild 11 zeigt den Querschnitt eines drehungsarmen Drahtseiles 36x7. Bild 12 zeigt die äußere Oberfläche eines derartigen Seiles nach einigen Monaten Einsatzzeit. Das Drahtseil hat nicht einen einzigen sichtbaren Drahtbruch. Nach dem Abschälen der äußeren Litzenlage findet man eine Vielzahl von Drahtbrüchen auf der Oberfläche der Stahleinlage an den Überkreuzungsstellen der Stahleinlage mit den Außenlitzen (Bild 13). Nach dem Abschälen der äußeren Litzenlage der Stahleinlage zeigt auch die erste Litzenlage der Stahleinlage eine große Zahl von Drahtbrüchen (Bild 14).

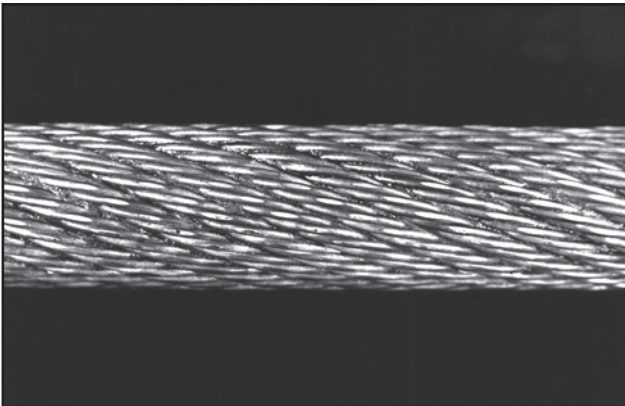


Bild 12:
Seil 36x7 nach einigen Monaten Einsatzzeit. Das Seil zeigt keine äußerlich sichtbaren Drahtbrüche.

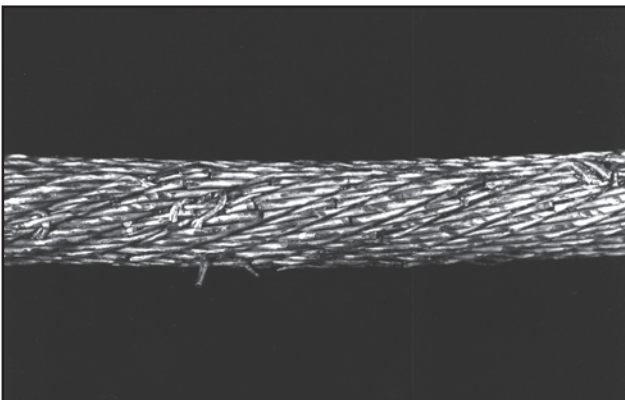


Bild 13:
Nach Abschälen der Aussenlitzen werden viele Drahtbrüche auf der Stahleinlage an den Überkreuzungsstellen der Litzenlagen sichtbar.

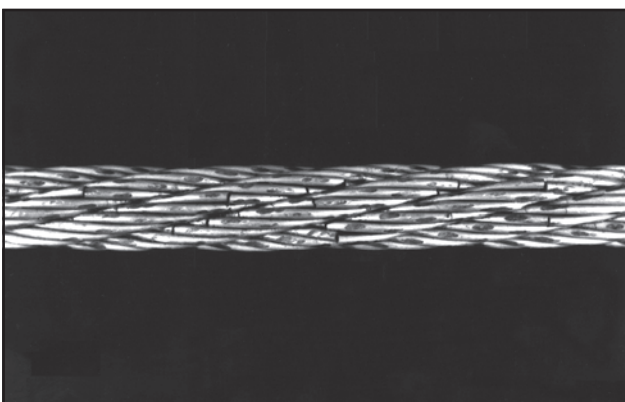


Bild 14:
Die innerste Litzenlage zeigt eine Vielzahl von Drahtbrüchen.

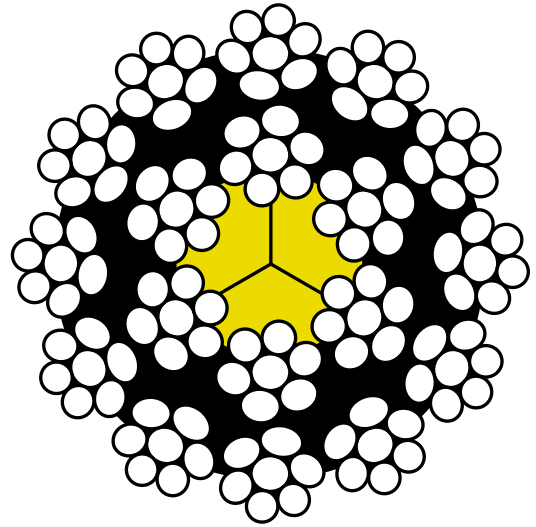
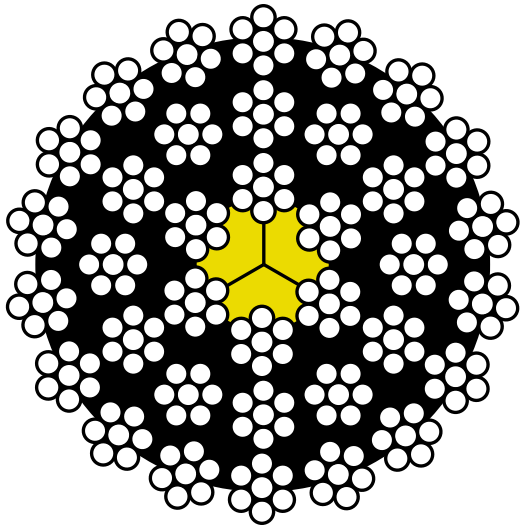


Bild 11: *Drehungsarmes Hubseil (36x7)*

Bild 15: *Drehungsarmes Hubseil (18x7)*

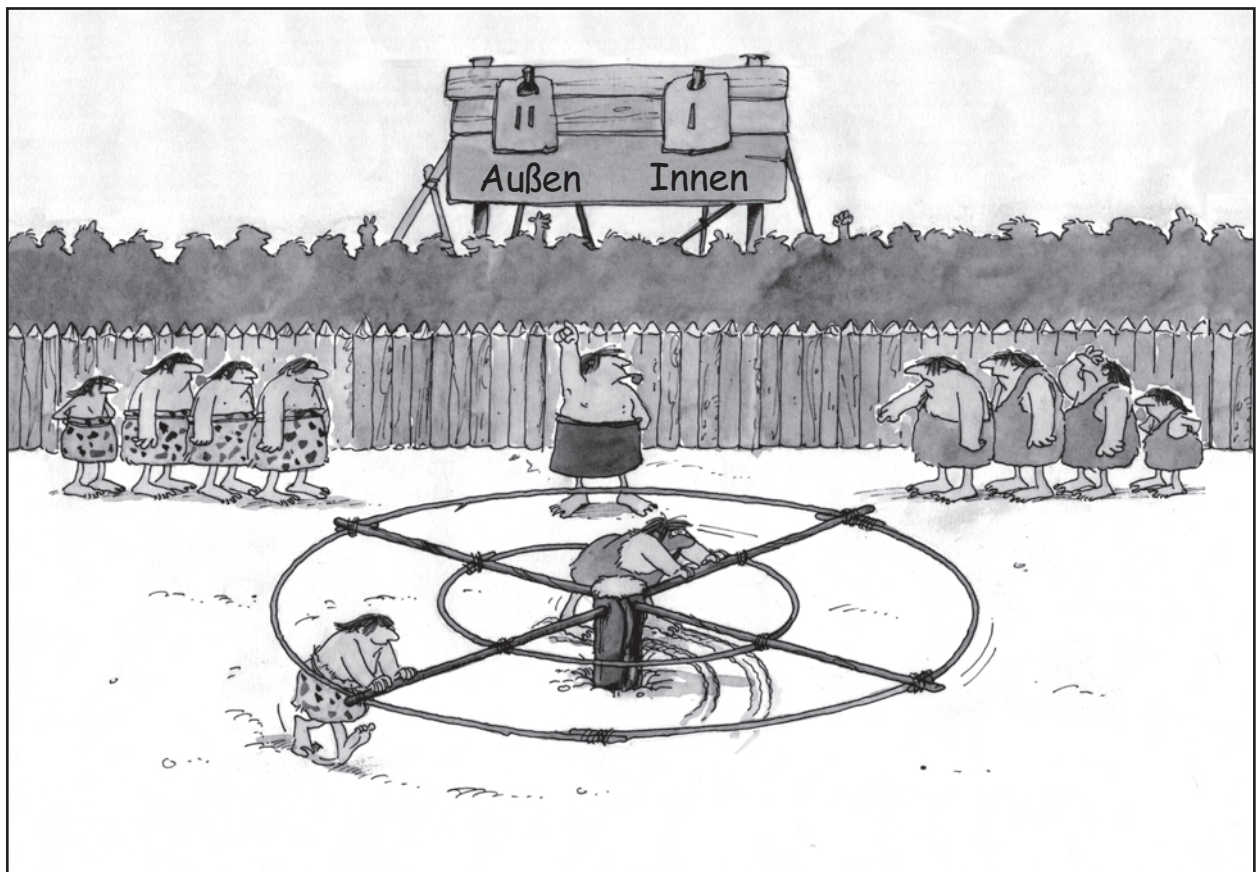


Bild 16: *Die Außenlizen sind aufgrund des größeren Hebelarms im Vorteil.*

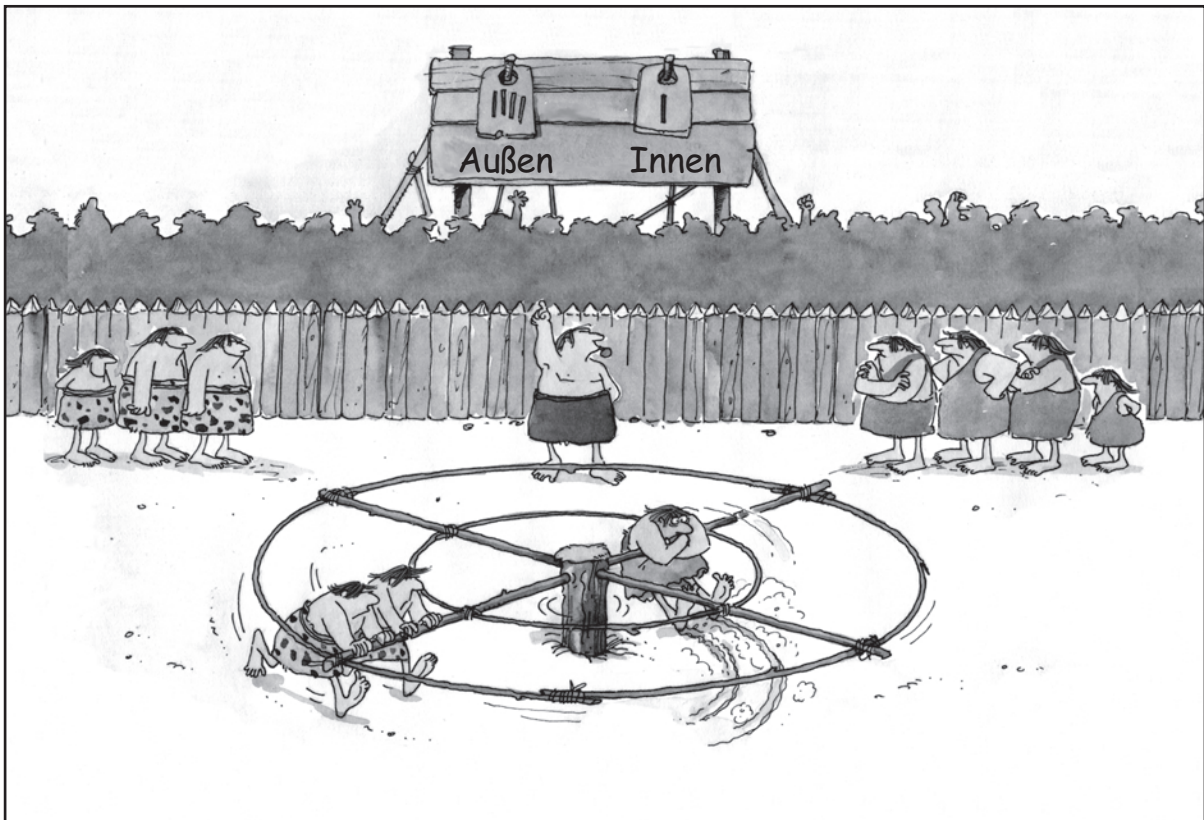


Bild 17: *In einem Seil 18x7 ist der Metallquerschnitt der Außenlitzen doppelt so groß wie der des Kernseils.*

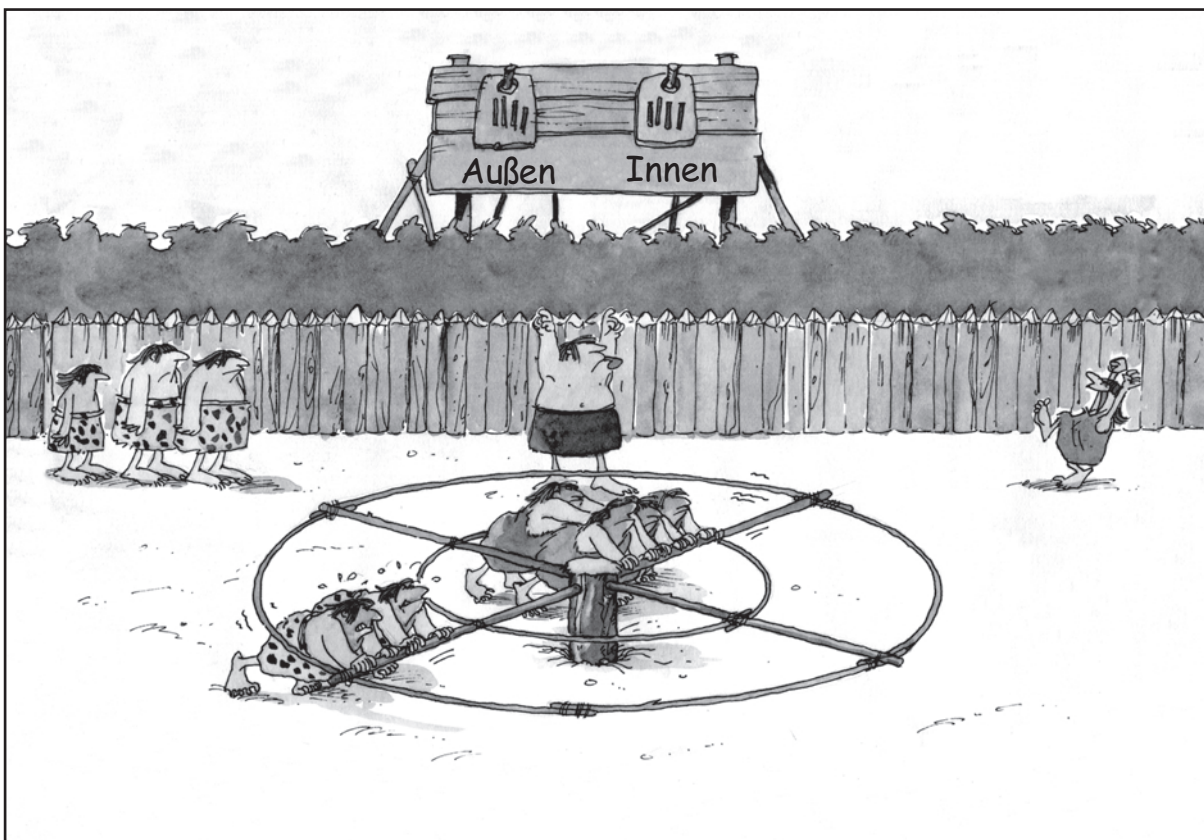


Bild 18: *In den drehungsfreien Casar-Hubseilen ist der Metallquerschnitt des Kernseiles größer als der Metallquerschnitt der Außenlitzen. Hierdurch wird ein Gleichgewicht hergestellt, ohne daß einzelne Litzen überbeansprucht werden.*

4.1 Intermezzo: Drehungsarme und drehungsfreie Drahtseile

Falls Sie Drahtseile der Machart 18x7 (Bild 15) oder 19x7 oder eine ihrer verdichteten Varianten als Hubseil auf einem Kran einsetzen, erzählen Sie es nicht Ihrer Haftpflichtversicherung!

Diese Drahtseile haben ein eingebautes Problem, wie das folgende Beispiel zeigt: Zwei Gruppen von Sportlern versuchen, ein Drehkreuz in entgegengesetzten Richtungen zu drehen. Es ist ein sehr unfairer Wettkampf, denn die eine Gruppe greift außen am Drehkreuz an und hat somit einen erheblich größeren Hebelarm als ihre innen angreifenden Gegner (Bild 16).

Wenn schon bei der gleichen Zahl von Wettkämpfern innen und außen die innen Kämpfenden keine Chance haben, um wieviel schlimmer wird es ihnen dann ergehen, wenn außen doppelt so viele Wettkämpfer antreten wie innen (Bild 17)?

Dies nämlich sind genau die Verhältnisse der Seile 18x7, 18x19 und ihrer zahlreichen Varianten. Diese Seile haben 6 innenliegende Litzen, die sich gegen 12 Außenlitzen von gleichem Durchmesser und exakt doppelt so langen Hebelarmen behaupten müssen. Derartige Seile können nur dann halbwegs drehstabil sein, wenn die inneren Litzen hoffnungslos überlastet werden!

Mit anderen Worten: In diesen Drahtseilen wird das Kernseil immer überproportional belastet werden und deshalb erheblich schneller als die Außenlitzen versagen. Die inneren Drahtbrüche sind somit bereits durch den Seilaufbau vorprogrammiert.

Bild 18 zeigt, wie Drehstabilität erzeugt werden sollte: Die Athleten im Inneren, die den kürzeren Hebelarm besitzen, sollten zahlreicher sein als die Athleten außen mit dem längeren Hebelarm!

Und genau auf diese Weise erzeugt ein gutes drehungsfreies Drahtseil Stabilität, ohne das Kernseil zu überlasten: der Metallquerschnitt des Kernseiles ist erheblich größer als der Metallquerschnitt der Außenlitzen.

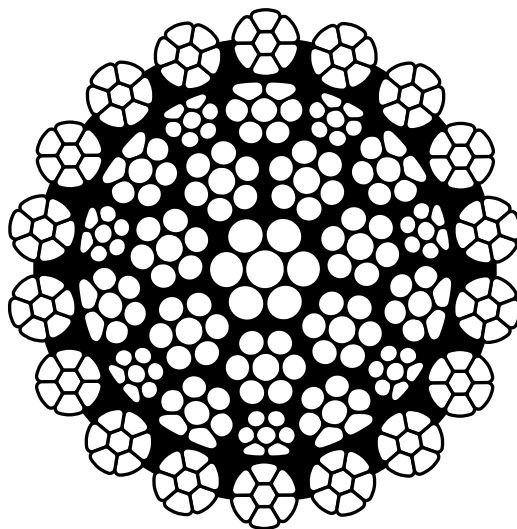


Bild 19: *40-litziges drehungsfreies Hubseil mit verdichteten Außenlitzen und einem verdichteten Kernseil (Casar Eurolift)*

4.2 Lösung: Drehungsfreie Spezialdrahtseile mit einem verdichteten Seilkern und verdichteten Außenlitzen

Bild 19 zeigt den Querschnitt eines 40-litzigen drehungsfreien Drahtseils mit einem verdichteten Kernseil und verdichteten Außenlitzen (Casar Eurolift). Die Verdichtung des Kernseiles als Ganzes führt zu einer erhöhten Bruchkraft und zu einer größeren Drehstabilität des Seiles. Zusätzlich sorgt die vergrößerte Auflagefläche der Außenlitzen auf dem Kernseil für geringere Pressungen an den Auflagestellen (Bild 20), was die Gefahr innerer Drahtbrüche weiter reduziert.

Drehungsfreie Drahtseile wie Casar Eurolift sollten vorzugsweise mit einem offenen Wirbel eingesetzt werden.

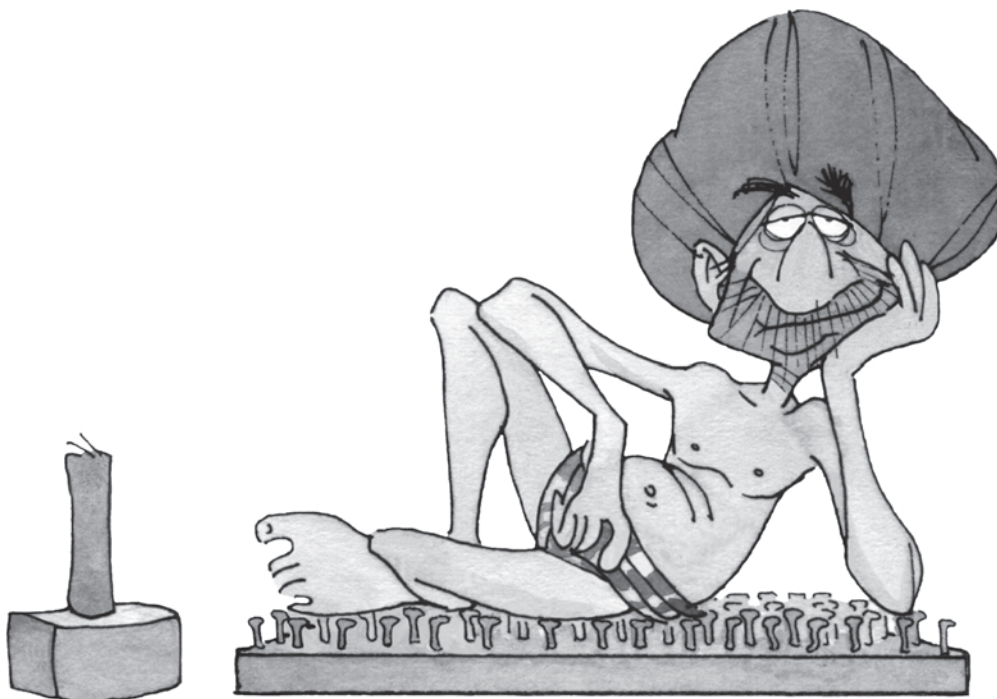


Bild 20: *Die vergrößerten Auflageflächen auf dem abgeflachten Kernseil reduzieren die Pressungen zwischen dem Kernseil und den verdichteten und geglätteten Außenlitzen und verringern so die Gefahr innerer Drahtbrüche.*

5 Die magnetinduktive Drahtseilprüfung

Innere Drahtbrüche können mit Hilfe von magnetinduktiven Prüfgeräten festgestellt und lokalisiert werden. Magnetinduktive Prüfungen von Drahtseilen können durch qualifiziertes Personal des Kranbetreibers oder durch unabhängige Dienstleister durchgeführt werden (Bild 22).

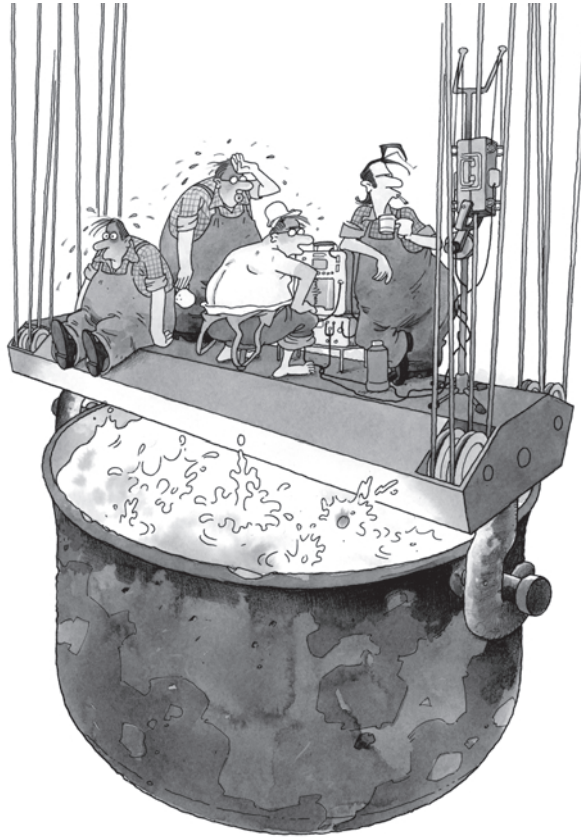


Bild 21: *Magnetinduktive Drahtseilprüfung unter Last*

6 Problem: Korrosion von Stahldrahtseilen

Die gesamte Oberfläche aller Drähte, aus denen ein Drahtseil aufgebaut ist, ist ungefähr 16 mal so groß wie die Oberfläche einer Stahlstange mit vergleichbarem Metallquerschnitt (Bild 21). Dies bedeutet, dass, wenn nicht andere Maßnahmen ergriffen werden, Drahtseile in einer korrosiven Umgebung etwa 16 mal so schnell korrodieren wie eine Stahlstange.

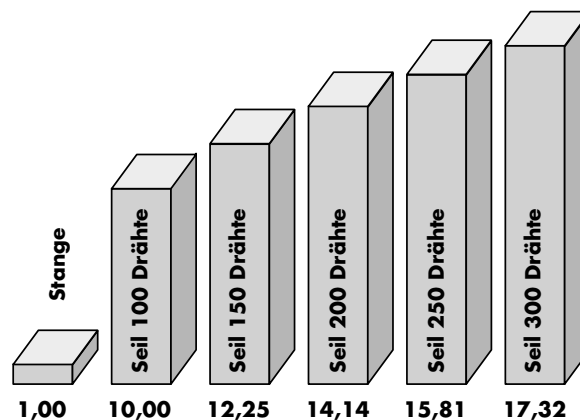


Bild 22: *Die Summe der Oberflächen der Drähte eines Drahtseils ist ungefähr 16 mal so groß wie die Oberfläche einer Stange mit vergleichbarem Metallquerschnitt.*

6.1 Lösung 1: Verzinkte Drähte und kunststoffummüllte Stahleinlagen

Stahldrahtseile, die in korrosiver Umgebung arbeiten, sollten aus verzinkten Drähten hergestellt werden. Selbst wenn die Zinkauflage lokal, beispielsweise durch Abrieb, abgetragen sein sollte, würden die freiliegenden Stahlzonen durch den Zink in ihrer Umgebung elektrochemisch geschützt werden (kathodische Protektion).

Die Stahleinlage des Seiles sollte zusätzlich kunststoffummantelt sein. Ein Kunststoffmantel schließt zum einen das Schmiermittel in der Stahleinlage ein und verhindert zum anderen das Eindringen korrosiver Elemente.

6.2 Lösung 2: Regelmäßige Nachschmierung

Die Drahtseile werden im Laufe ihrer Einsatzzeit mehr und mehr von ihrer Zinkauflage verlieren. Zusätzlich wird mehr und mehr ihres Schmierstoffs aufgebraucht werden. Deshalb sollten die Drahtseile während ihrer Einsatzzeit in regelmäßigen Abständen nachgeschmiert werden, um die Reibung zwischen den Seilelementen zu verringern und ihre Oberflächen gegen Korrosion zu schützen. Bild 23 zeigt verschiedene Methoden zur Nachschmierung von Drahtseilen.

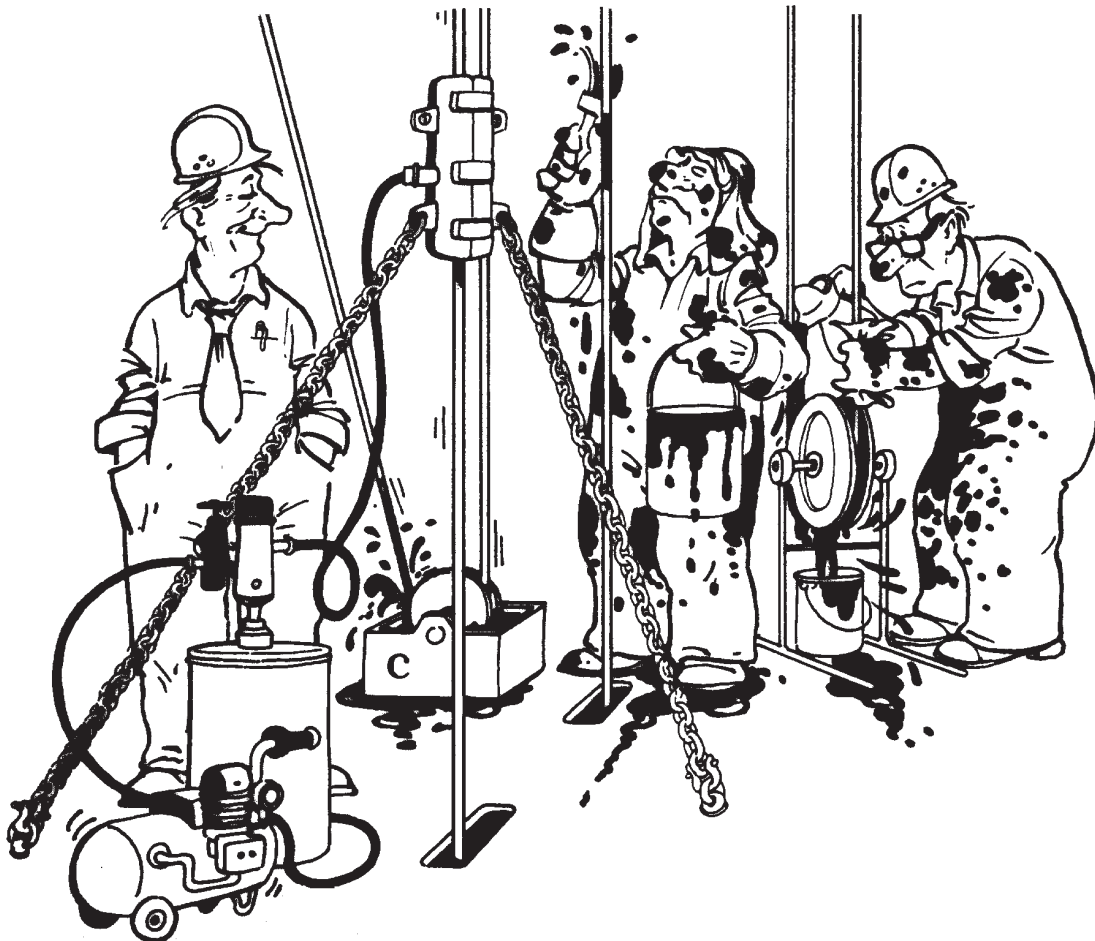


Bild 23: *Nachschmierung von Drahtseilen*

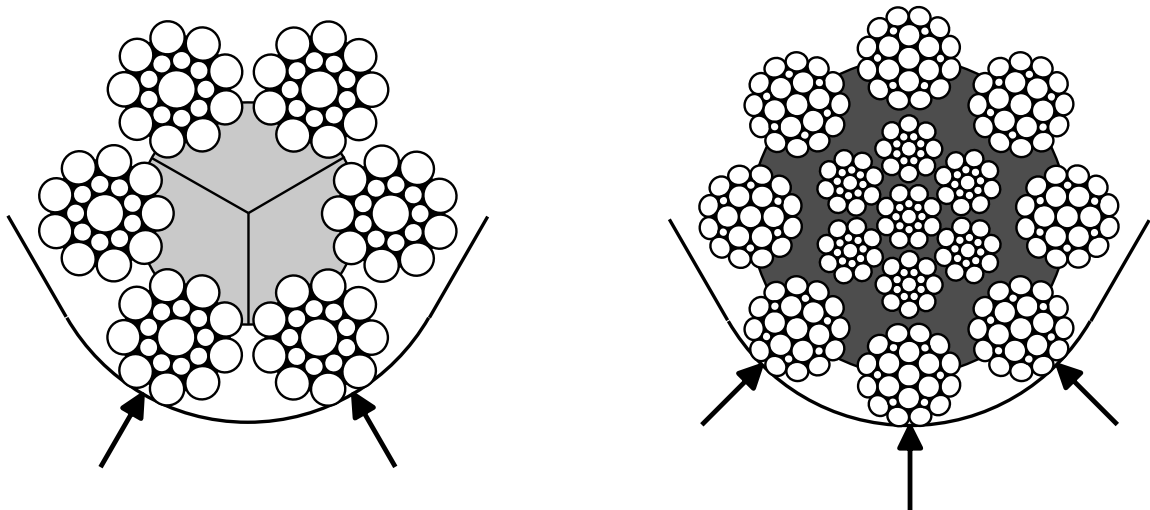


Bild 24: *Wegen ihrer größeren Zahl von Auflagepunkten in der Seilrille und den hieraus resultierenden geringeren Pressungen haben 8-litzige Drahtseile (z. B. Casar Strastoplast, rechts) eine höhere Biegewechselfestigkeit als 6-litzige Drahtseile (links).*

7 Problem: Ungenügende Lebensdauer von Drahtseilen

Kranseile werden im Betrieb Biegewechselbeanspruchungen und schwellenden Zugbeanspruchungen ausgesetzt. Häufig entspricht ihre Ermüdungsfestigkeit nicht den Erwartungen des Betreibers.

7.1 Lösung 1: Drahtseile mit höherer Ermüdungsfestigkeit

Drahtseile verschiedener Machart haben verschieden hohe Ermüdungsfestigkeiten. Wegen ihrer höheren Elementezahl – resultierend in geringeren Biegespannungen – und ihrer größeren Zahl von Auflagepunkten in der Seilscheibe – resultierend in geringeren Flächenpressungen – sind 8-litzige Seile bei Biegewechselbeanspruchung erheblich ermüdungsfester als 6-litzige Seile (Bild 24).

Drahtseile mit verdichteten Außenlitzen (Bild 25) haben einen größeren Metallquerschnitt als Drahtseile, die aus konventionellen Litzen aufgebaut sind. Sie arbeiten deshalb bei gleicher äußerer Belastung unter einer geringeren spezifischen Zugbeanspruchung. Sie haben zudem eine deutlich vorteilhaftere Auflage auf der Seilscheibe als Drahtseile mit konventionellen Außenlitzen (Bild 26). Deshalb haben Drahtseile mit verdichteten Außenlitzen normalerweise eine größere Lebensdauer als Drahtseile mit konventionellen Außenlitzen.

Drahtseile mit einer Kunststoffzwischenlage zwischen der Stahleinlage und den Außenlitzen sind nicht nur unter Biegewechselbeanspruchung erheblich ermüdungsfester als vergleichbare Drahtseile ohne Kunststoffzwischenlage, sie zeigen auch eine deutlich höhere Ermüdungsfestigkeit unter schwellender Zugbeanspruchung.

Unter dynamischer Zugbeanspruchung reduziert das Drahtseil seinen Durchmesser und komprimiert hierbei die Kunststoffzwischenlage. Diese verhält sich hierbei wie ein Stoßdämpfer und reduziert die Spitzenspannungen in den Seildrähten.

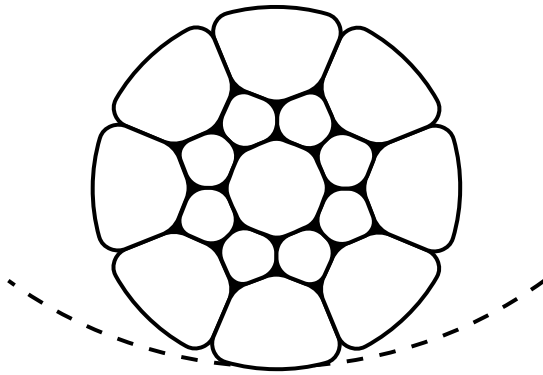


Bild 25: *Gute Auflageverhältnisse für eine verdichtete Außenlitze*

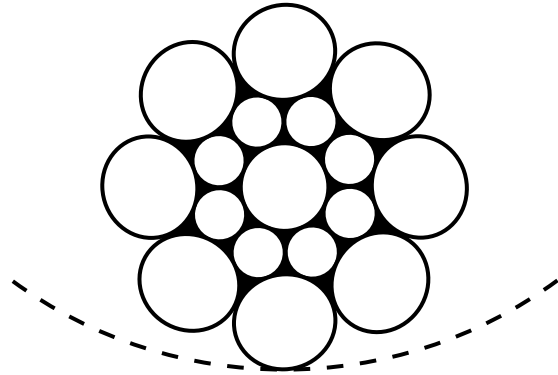


Bild 26: *Schlechte Auflageverhältnisse für eine konventionelle Außenlitze*

Da dynamische Kräfte normalerweise über das Drahtseil in den Kran eingeleitet werden, sorgt dieser eingebaute Stoßdämpfer nicht nur für eine bessere Lebensdauer des Drahtseils selbst; auch die dynamischen Kräfte auf die übrigen Krankomponenten werden deutlich reduziert.

7.2 Lösung 2: Optimieren Sie Ihren Seildurchmesser!

Professor Feyrer von der Universität Stuttgart hat eine Formel zur Vorausberechnung der Drahtseillebensdauer entwickelt.

$$\lg N = b_0 + (b_1 + b_4 \cdot \lg \frac{D}{d}) \cdot (\lg \frac{S d_0^2}{d^2 S_0} - 0.4 \cdot \lg \frac{R_0}{1770}) + b_2 \cdot \lg \frac{D}{d} + b_3 \cdot \lg \frac{d}{d_0} + \frac{1}{b_5 + \lg \frac{1}{d}}$$

Die drahtseilspezifischen Parameter b_0 bis b_5 müssen in einer großen Zahl von Dauerbiegeversuchen für jede einzelne Seilkonstruktion ermittelt werden. Die Parameter sind inzwischen für eine größere Zahl von Normseilen und Casar Spezialdrahtseilen bekannt.

Der Autor hat ein Programm geschrieben, welches die Drahtseillebensdauer bis Ablegereife und bis Bruch in Abhängigkeit von der gewählten Seilkonstruktion, dem Seilnenndurchmesser, dem Seilscheibendurchmesser und der Stranglast errechnet. Wenn die Geometrie und die Arbeitsbedingungen des Kranes bekannt sind, kann die Anzahl der Hübe bis zur Ablegereife und bis zum Bruch des Drahtseiles vorausgesagt werden.

Selbst wenn die absolute Zahl der Biegewechsel nicht von Interesse ist, kann das Programm dazu genutzt werden, das Ermüdungsverhalten verschiedener Seilkonstruktionen unter den gegebenen Bedingungen miteinander zu vergleichen.

Das Programm bietet zudem die Möglichkeit, einen *Optimalen Seilnenndurchmesser* zu berechnen. Bild 27 zeigt die Biegewechselzahl bis Ablegereife (untere Kurve) und

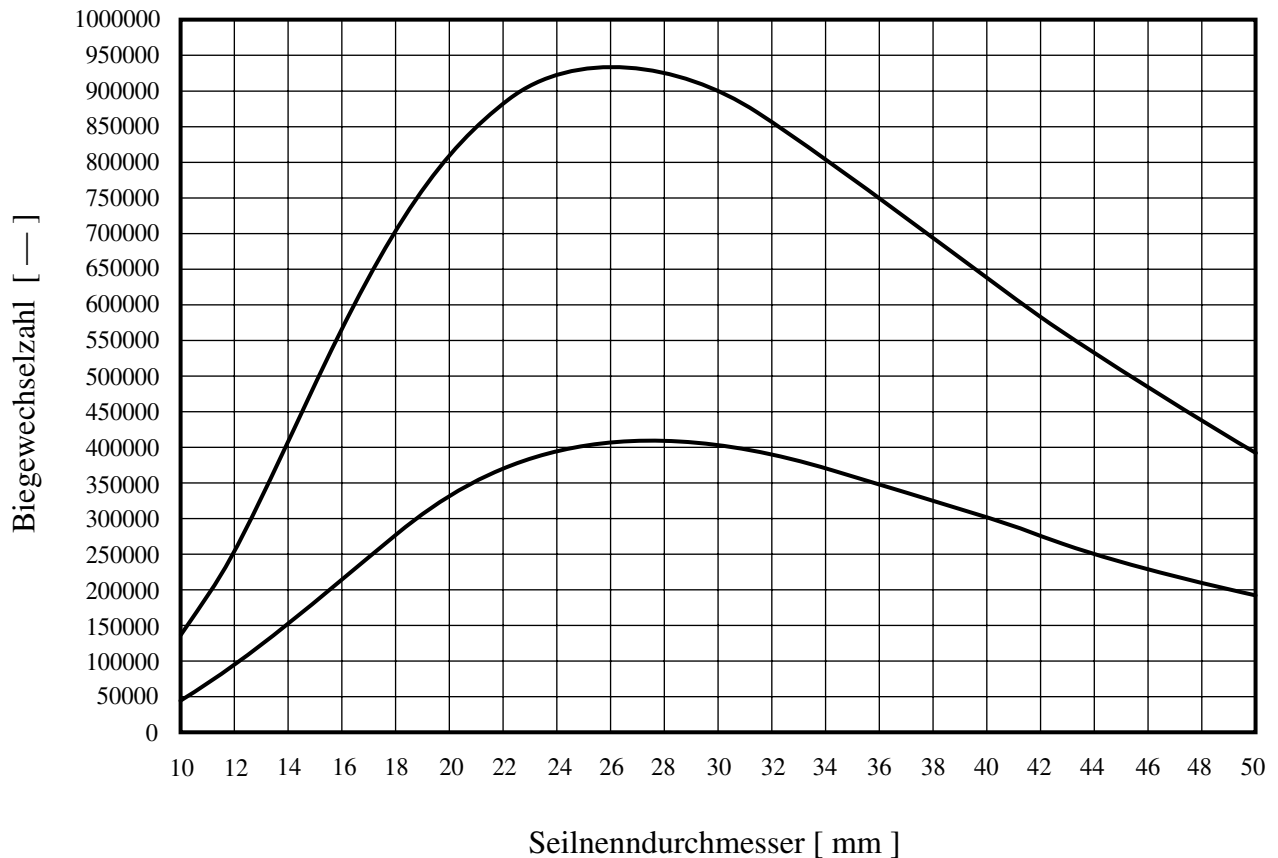


Bild 27: *Biegewechselzahl bis Ablegereife (untere Kurve) und bis Bruch (obere Kurve) in Abhängigkeit vom Seilennendurchmesser*

bis Bruch (obere Kurve) in Abhängigkeit vom Seilennendurchmesser für eine gegebene Seilkonstruktion, eine Stranglast von 40.000N und einen Seilscheibendurchmesser von 600mm.

Ein Seil vom Nenndurchmesser 10mm muß bereits nach 50.000 Biegewechseln abgelegt werden. Zwar ist das Verhältnis von Scheibendurchmesser zum Seilennendurchmesser (D/d -Verhältnis) von 60 sehr vorteilhaft für das 10mm-Seil, aber offensichtlich ist die Stranglast von 40.000N viel zu hoch für ein Seil mit einem so kleinen Durchmesser.

Wenn der Seildurchmesser auf 20mm verdoppelt wird, steigt die Biegewechselzahl auf 340.000, also auf fast den 7-fachen Wert des ersten Ergebnisses. Das D/d -Verhältnis hat sich auf 30 verringert, aber der metallische Querschnitt des Seiles hat sich vervierfacht und die spezifische Zugbeanspruchung entsprechend reduziert.

Das 20mm-Seil kann die Stranglast von 40.000N trotz reduziertem D/d -Verhältnis somit erheblich besser ertragen als das 10mm-Seil.

Wenn der Seildurchmesser noch einmal auf 40mm verdoppelt wird, steigt die Biegewechselzahl jedoch nicht weiter an. Das 40mm-Seil erzielt 300.000 Biegewechsel. Dies ist ein Ergebnis, welches etwas unter dem eines Seiles von 20mm liegt.

Das 40mm-Seil hat einen Metallquerschnitt, der 16 mal so groß ist wie der des 10mm-Seiles. Es ermüdet nicht wegen der Stranglast von 40.000N, sondern weil sich das D/d -Verhältnis auf den sehr unvorteilhaften Wert von 15 verringert hat.

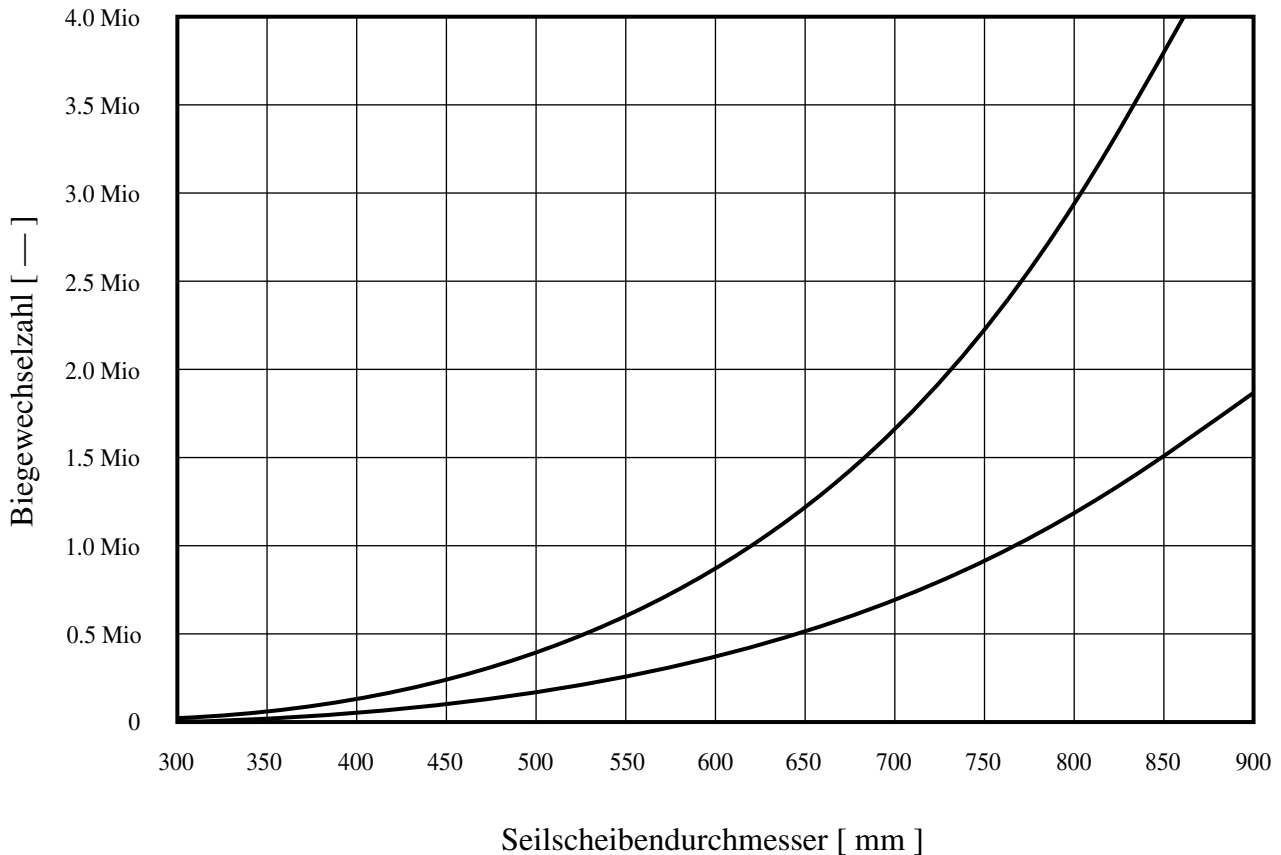


Bild 28: *Biegewechselzahl bis Ablegereife (untere Kurve) und bis Bruch (obere Kurve) in Abhängigkeit vom Seilscheibendurchmesser*

Im linken Teil der Kurven von Bild 27 haben die Drahtseile vorteilhafte D/d -Verhältnisse. Sie versagen aufgrund zu hoher Zugspannung. Im rechten Teil der Kurven haben die Seile vorteilhafte Zugspannungen. Sie versagen hier infolge zu hoher Biegespannungen, die aus zu geringen D/d -Verhältnissen resultieren.

Zwischen diesen beiden Zonen finden wir die Maxima der Lebensdauerkurven bei *dem* Seilnenndurchmesser, für den die Summen der schädigenden Einflüsse von Stranglast und Biegespannungen minimal werden. Der Drahtseildurchmesser, für den die Biegewechselzahlen ein Maximum erreichen, wird der *Optimale Seilnenndurchmesser* genannt. In Bild 27 ist der Optimale Seilnenndurchmesser 27mm. Für diesen Seilnenndurchmesser wird eine mittlere Biegewechselzahl von 410.000 bis Ablegereife erreicht.

Ein Krankonstrukteur sollte keinen Drahtseilnenndurchmesser auswählen, der größer ist als der Optimale Seilnenndurchmesser. Er würde lediglich mehr Geld für weniger Lebensdauer bezahlen. Er sollte im Gegenteil einen Seilnenndurchmesser wählen, der geringfügig kleiner ist als der Optimale Seilnenndurchmesser: In unserem Beispiel (Bild 27) würde ein Seil mit einem Nenndurchmesser von 24mm fast die gleiche Lebensdauer erzielen wie ein Seil mit einem Nenndurchmesser von 27mm.

Das Seil von 24mm ist jedoch 10% dünner als der Optimale Seilnenndurchmesser. Dies bedeutet, dass mit einem deutlich preiswerteren Drahtseil fast die gleiche Lebensdauer erzielt werden kann. Weiterhin kann bei Verwendung eines Drahtseiles

mit kleinerem Durchmesser die Trommelbreite erheblich reduziert werden, was zusätzlich die Baukosten des Kranes senkt.

Der wirtschaftlichste Seilnennendurchmesser ist immer geringfügig kleiner als der Optimale Seilnennendurchmesser, er liegt je nach Bauform des Kranes beispielsweise bei 90% des Optimalen Seilnennendurchmessers.

Im Stahlbau bedeutet 'dicker' meistens 'langlebiger'. Bei Drahtseilen bewahrheitet sich oft das Gegenteil.

7.3 Lösung 3: Optimieren Sie Ihren Scheibendurchmesser!

Durch Vergrößerung des Scheibendurchmessers kann die Lebensdauer von laufenden Drahtseilen verlängert werden. Das oben erwähnte Programm berechnet, um wieviel ein Scheibendurchmesser vergrößert werden muß, um das gewünschte Resultat zu erzielen.

Bild 28 zeigt die Biegewechselzahl bis Ablegereife (untere Kurve) und bis Bruch (obere Kurve) in Abhängigkeit vom Scheibendurchmesser. Bei einem Scheibendurchmesser von 600mm ist die Biegewechselzahl bis Ablegereife 400.000. Bei Erhöhung des Scheibendurchmessers um beispielsweise 15 mm (+ 25%) steigt die Biegewechselzahl auf 900.000 (+125%).

7.4 Lösung 4: Vermeidung unnötiger Ermüdungsbeanspruchung

Häufig werden Drahtseile in unnötigem Maße durch Biegewechselbeanspruchung geschädigt. Als Beispiel sollen hier die Lebensdauern zweier Drahtseile verglichen werden, die unter sonst identischen Bedingungen mit zwei unterschiedlichen Hakenflaschen eingesetzt werden.

Bild 29 zeigt eine Hakenflasche mit zwei kleinen Seilscheiben. Während jeder Hubbewegung wird die Drahtseillänge, die durch die Hakenflasche läuft, *zwei* Biegewechseln unterworfen. Bild 30 zeigt eine Hakenflasche mit nur einer großen Seilscheibe. Während jeder Hubbewegung wird die Seillänge, die durch die Hakenflasche läuft, nur *einem* Biegewechsel unterworfen.

Diese Tatsache allein würde bereits die Seillebensdauer verdoppeln. Der Scheibendurchmesser ist jedoch zweieinhalb mal so groß wie in der ersten Hakenflasche, und die Biegewechselzahl, die bei Biegung um einen derartig großen Durchmesser erzielt werden kann, ist neunmal so hoch wie bei den kleinen Seilscheiben. Deshalb erhöht sich die Lebensdauer des Drahtseiles noch einmal um einen Faktor 9. Insgesamt wird die Seillebensdauer in der einrolligen Hakenflasche daher 18 mal so hoch sein wie in der zweirolligen Ausführung!

Abhängig von den Randbedingungen wird ein Gegenbiegewechsel ein Drahtseil etwa 2 bis 7 mal so stark schädigen wie ein einfacher Biegewechsel. Das Drahtseil des in Bild 31 gezeigten Hubwerkes wird, da es keinem Gegenbiegewechsel unterworfen ist, allein hierdurch 1,5 bis 4 mal so lange leben wie das Drahtseil des Hubwerkes aus Bild 32.

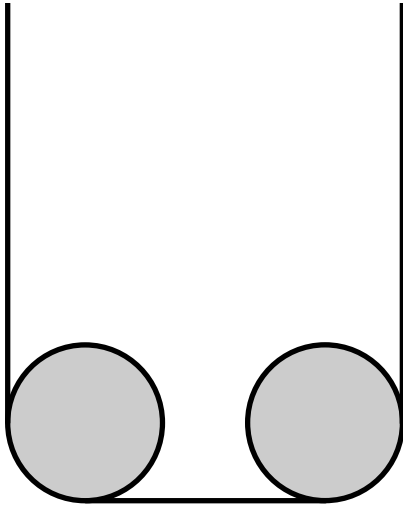


Bild 29: *Hakenflasche mit zwei kleinen Seilscheiben*

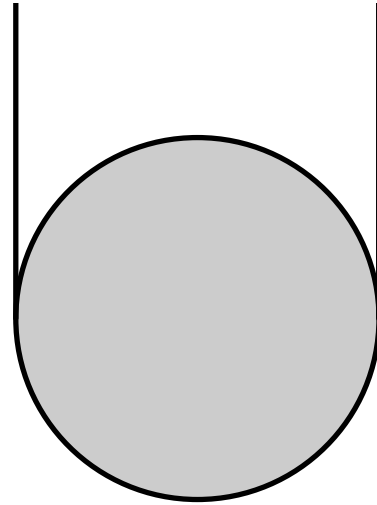


Bild 30: *Hakenflasche mit einer großen Seilscheibe*

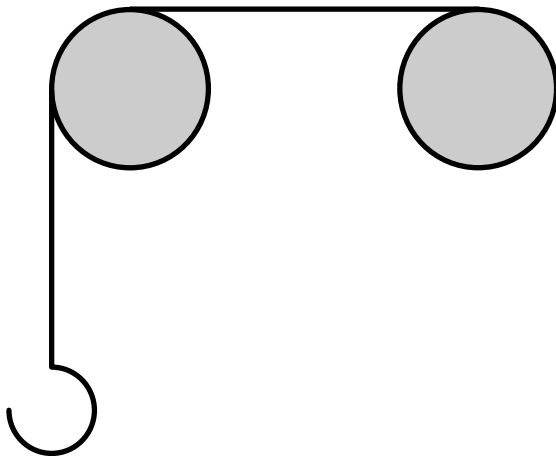


Bild 31: *Hubwerk mit Einfachbiege wechseln*

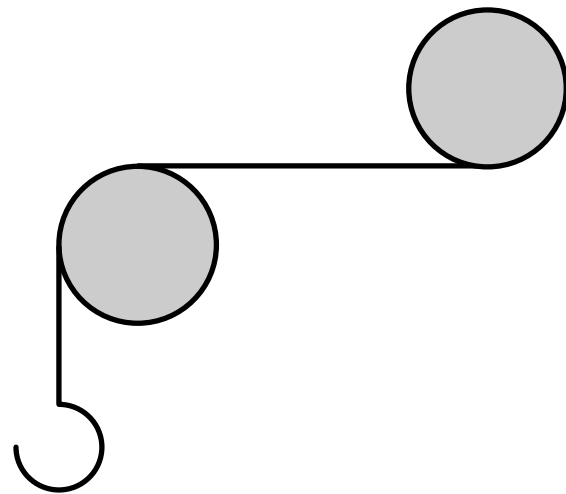


Bild 32: *Hubwerk mit Gegenbiegewechsel*

7.5 Lösung 5: Optimieren Sie die Zugschwellfestigkeit durch Reduzierung des Drahtseildurchmessers!

In Zugschwellversuchen mit einer gegebenen Lastamplitude verringert sich die Lebensdauer eines Prüfkörpers normalerweise mit zunehmender Mittelspannung. Zugschwellversuche, die an der Universität Stuttgart durchgeführt wurden, zeigen jedoch, dass sich Drahtseile bis zu einer Gesamtbelastung von etwa 50% der Seilbruchkraft genau entgegengesetzt verhalten: Die Drahtseillebensdauer *erhöht* sich mit zunehmender Mittelspannung (Bild 33).

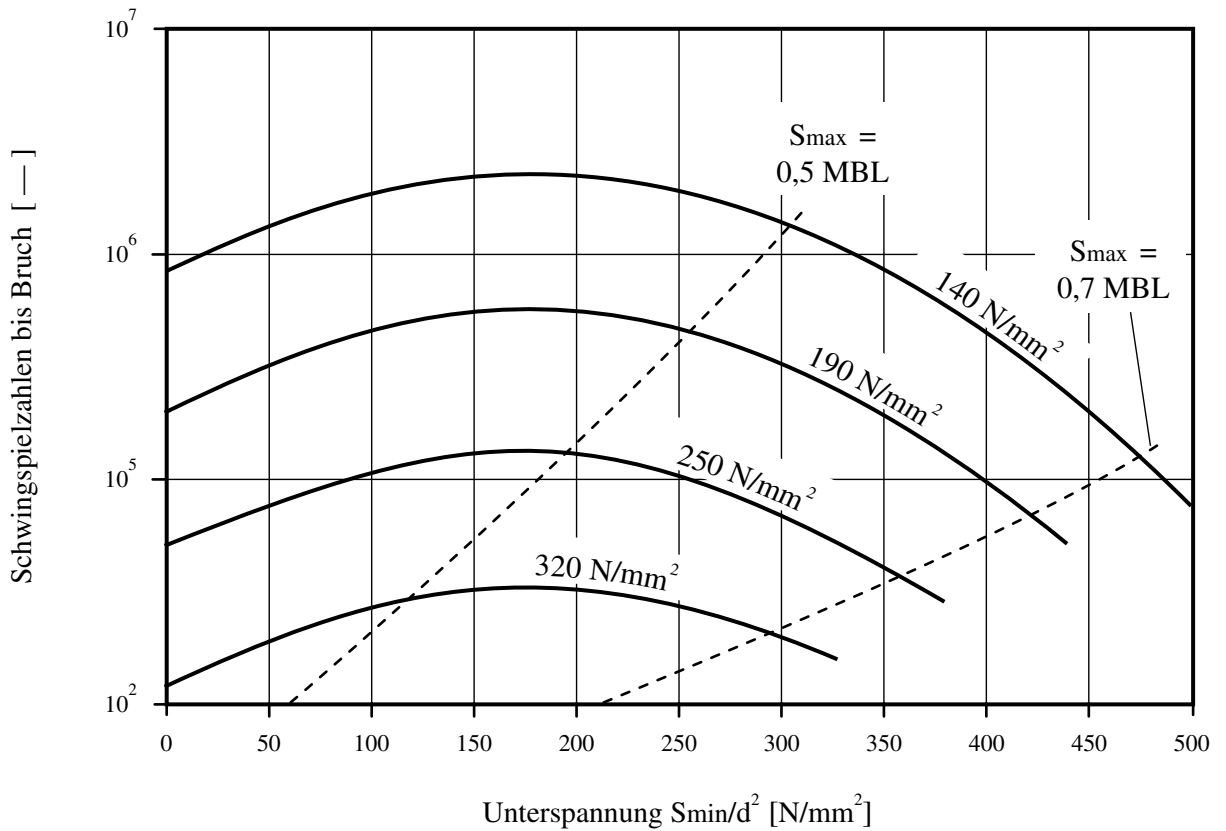


Bild 33: *Mit zunehmender Mittelspannung erzielen Drahtseile bis zu einer Gesamtbelastung von 50% ihrer Mindestbruchkraft höhere Schwingenspielzahlen.*

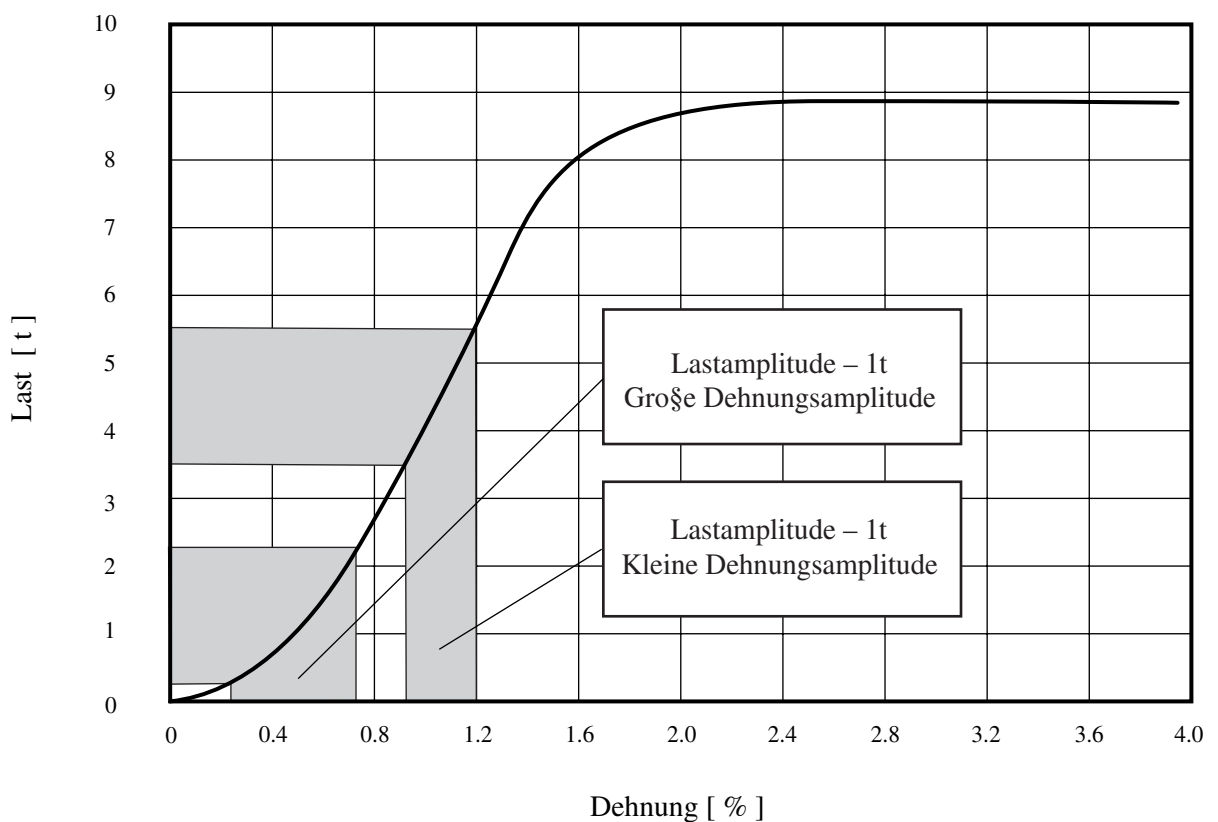


Bild 34: *Typisches Last-Dehnungsdiagramm. Die Dehnungsamplituden sind bei gleichen Lastamplituden für größere Mittellasten erheblich kleiner.*

Eine Erklärung für dieses Phänomen könnte sein, dass Drahtseile keine massiven Prüfkörper sind. Drahtseile stellen vielmehr einen Verbund aus vielen Elementen dar, die sich während der Lastwechsel relativ zueinander bewegen können und müssen. Wie man in einem typischen Last-Dehnungsdiagramm für Drahtseile (Bild 34) sehen kann, sind aber die Dehnungen der Drahtseile und somit auch die Relativbewegungen der Seilelemente zueinander für geringe Mittelspannungen viel kleiner als für große Mittelspannungen. Für schwellend beanspruchte Drahtseile, also beispielsweise für Abspannseile von Kranen, könnte dies bedeuten, dass die Lebensdauern der Drahtseile durch Verwendung kleinerer Seildurchmesser und kleinerer Sicherheitsbeiwerte erhöht werden könnte!

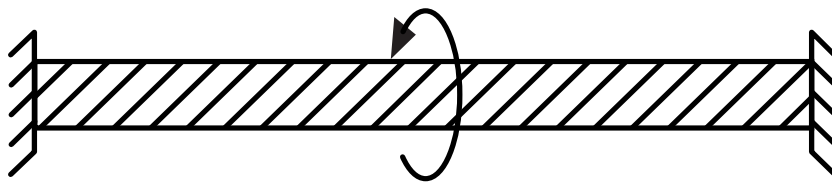


Bild 35: *Die gewaltsame Verdrehung eines Drahtseils ...*

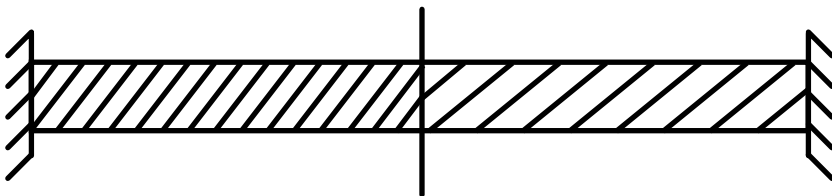


Bild 36: *... verkürzt die Schlaglänge auf der einen Seite (links) und verlängert sie auf der anderen (rechts).*

8 Problem: Litzenlockerungen und Korbbildungen

Jeder Kranbetreiber hat auf seinen Drahtseilen schon einmal Litzenlockerungen oder eine Korbformation vorgefunden. Als Erklärung für diese Seilverformungen werden häufig (sogar noch in der alten Ausführung der ISO 4309!) dynamische Belastungen von Drahtseilen angegeben. In den meisten Fällen werden Draht- und Litzenlockerungen sowie Korbbildungen jedoch durch andere Mechanismen hervorgerufen.

Die häufigste Ursache für das Auftreten von Draht- und Litzenlockerungen sowie für die Erzeugung von Korbbildungen sind Verdrehungen eines Drahtseiles um seine eigene Achse. Betrachten wir als Beispiel ein Seilstück, welches an beiden Enden befestigt und gegen Verdrehen gesichert ist. Wenn wir dieses Drahtseil in der Mitte fassen und einmal um seine eigene Achse verdrehen (Bild 35), verlängern wir es auf der einen Seite und verkürzen es auf der anderen (Bild 36). Als Folge werden auf der einen Seite die Außenlitzen (Bild 37) und auf der anderen Seite die Innenlitzen zu lang sein (Bild 38).



Bild 37: Längenüberschuß der Außenlitzen, verursacht durch Aufdrehen des Drahtseils

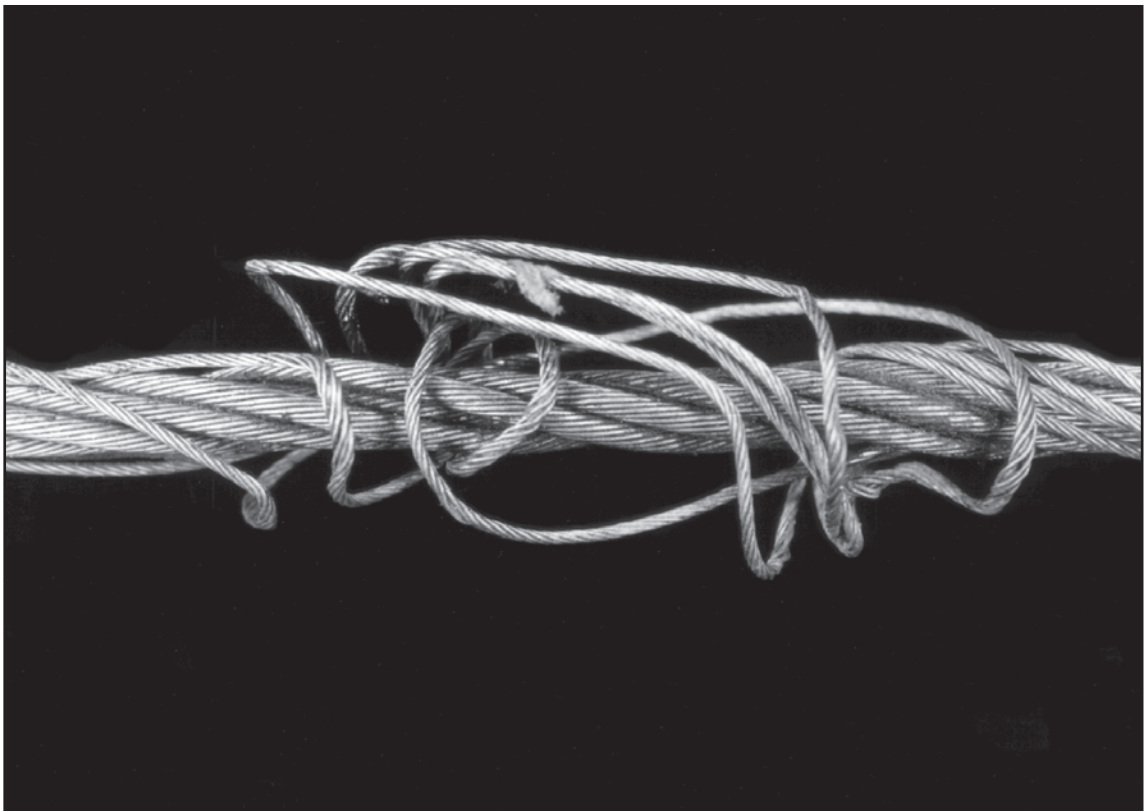


Bild 38: Längenüberschuß der Innenlitzen, verursacht durch Zudrehen des gleichen Drahtseils

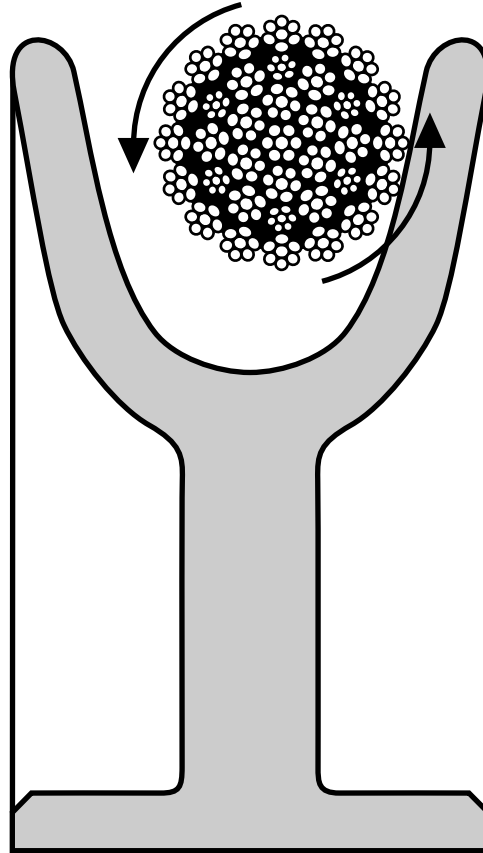


Bild 39: *Das Drahtseil rollt in den Rillengrund hinab. Es wird durch diesen Vorgang verdreht.*

Aber was könnte ein Drahtseil auf einem Kran um seine eigene Achse verdrehen? Jede Seilscheibe und jede Trommel könnte dies tun. Wenn ein Drahtseil unter einem Ablenkwinkel auf eine Seilscheibe aufläuft, wird es die Seilscheibe zuerst an der Flanke der Seilrille berühren und dann in den Rillengrund hinabrollen. (Bild 39). Während dieses Vorgangs wird das Drahtseil um seine eigene Achse verdreht. Mit zunehmendem Ablenkwinkel wird die Verdrehung zunehmen.

Die Bilder 40 und 41 zeigen eine Folge von Seilquerschnitten, die in einer Seilscheibe mit einem Rillenöffnungswinkel von 35° (nach US-Norm) hineinlaufen. Wenn das Drahtseil unter einem Ablenkwinkel von 1° in die Scheibe einläuft, berührt es die Flanken der Seilscheibe in einem sehr tiefen Punkt und wird lediglich um 5° verdreht.

Wenn das Drahtseil in die gleiche Seilscheibe unter einem Ablenkwinkel von 5° einläuft, wird es die Flanke in einer sehr hohen Position berühren und beim Hinabrollen um 50° verdreht werden!

Natürlich wird ein Drahtseil nicht immer wie ein Zahnrad an einer Zahnstange die Flanke hinabrollen. Die Abwärtsbewegung wird immer ein Mischung zwischen *Rollen* und *Gleiten* darstellen. Das Maß der Verdrehung, welches hierbei erzeugt wird, wird also sehr stark von der Reibung zwischen Drahtseil und Seilscheibe abhängen.

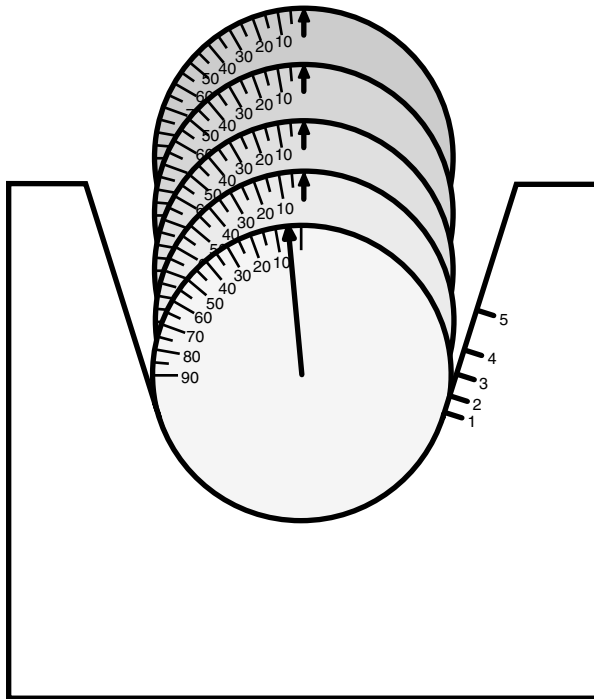


Bild 40: *Rillenöffnungswinkel 35°.
Geringe Seilverdrehung bei
einem Ablenkwinkel von 1°*

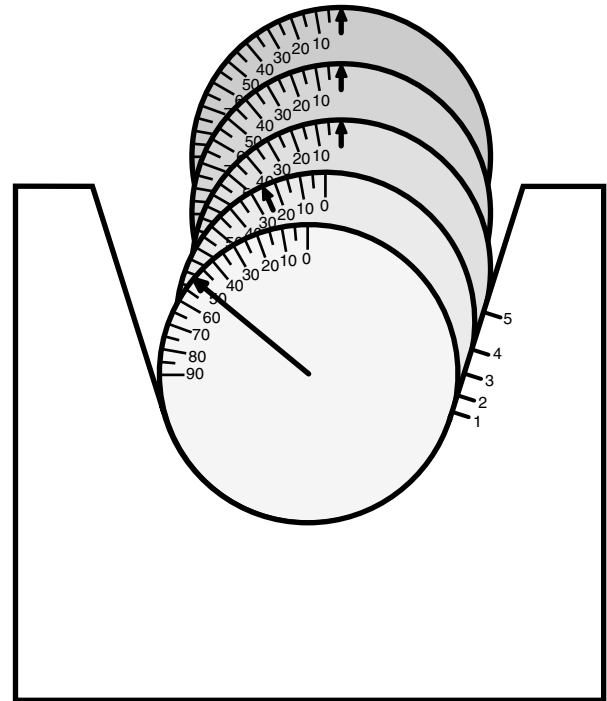


Bild 41: *Rillenöffnungswinkel 35°. Große
Seilverdrehung bei einem
Ablenkwinkel von 5°*

8.1 Lösung 1: Seilschmierung

Die einfachste Möglichkeit, den Reibungskoeffizienten zwischen Drahtseil und Seilscheibe zu reduzieren, ist, das Drahtseil zu schmieren. Ein gut geschmiertes Drahtseil wird beim Einlaufen in eine Seilscheibe viel weniger verdreht werden als ein trockenes oder korrodiertes Seil.

8.2 Lösung 2: Stahlscheiben anstelle von Kunststoffscheiben

Der Reibungskoeffizient zwischen Stahl und Kunststoff ist höher als der Reibungskoeffizient zwischen Stahl und Stahl. Unter den gleichen geometrischen Bedingungen wird daher ein Drahtseil auf einer Stahlscheibe erheblich weniger verdreht werden als auf einer Kunststoffscheibe. Kunststoffscheiben sollten daher bevorzugt in Positionen eingesetzt werden, wo die Ablenkwinkel klein sind.

8.3 Lösung 3: Seilscheiben mit größeren Öffnungswinkeln

Wenn die Seilscheibe einen größeren Öffnungswinkel besitzt, läuft das Drahtseil unter einem Ablenkwinkel viel tiefer in die Rille hinein, bevor es den Flansch berührt.

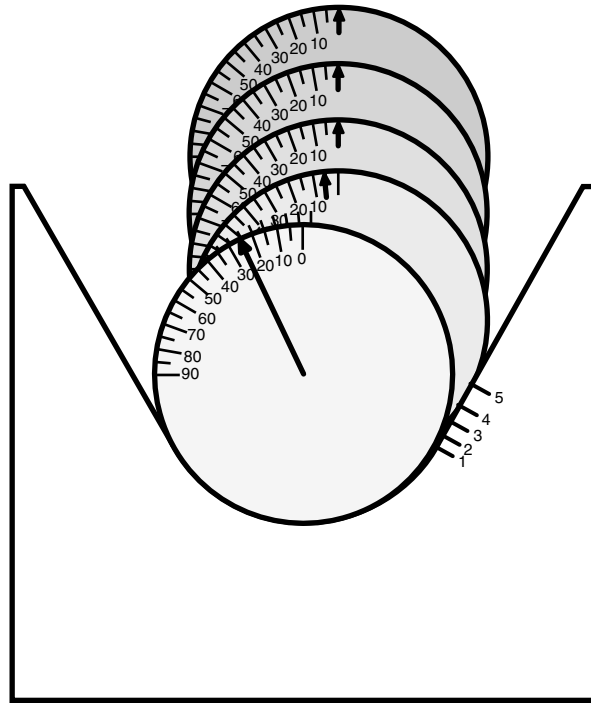


Bild 42: *Rillenöffnungswinkel 60°. Deutlich verringerte Seilverdrehung bei einem Ablenkwinkel von 5°*

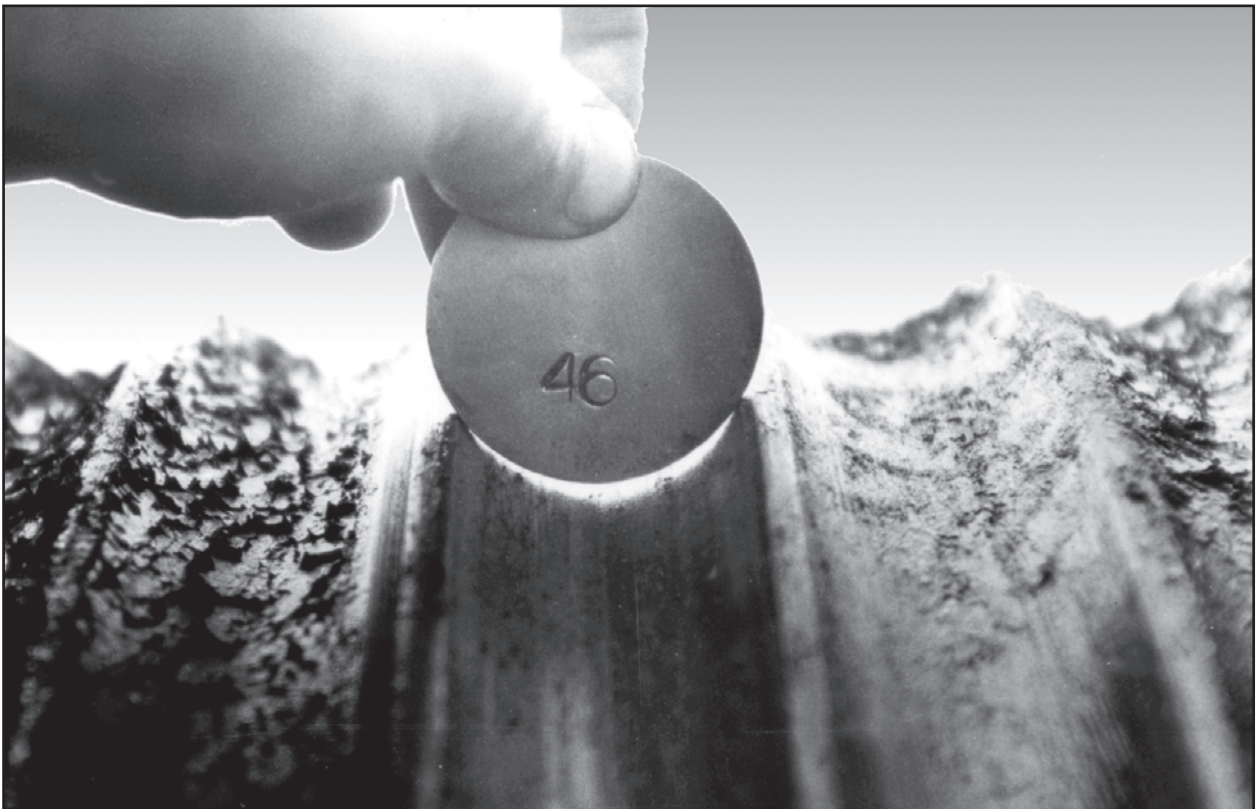


Bild 43: *Zu enge Seilrille*

Bild 42 zeigt eine Folge von Seilquerschnitten, die in eine Rille mit einem Öffnungswinkel von 60° unter einem Ablenkwinkel von 5° einlaufen. Das Drahtseil berührt die Flanke in einer deutlich tieferen Position als in Bild 39 und wird lediglich um 25° verdreht. Durch eine Vergrößerung des Öffnungswinkels von 35° auf 60° wird somit das Maß der Verdrehung um 50% reduziert.

Deshalb sollten Seilscheiben *mindestens* einen Öffnungswinkel von 45° aufweisen, wie in DIN 15061 festgelegt. Ein Öffnungswinkel von 52° (wie in British Standard) ist noch besser.

8.4 Lösung 4: Benutzen Sie Drahtseile mit einer Kunststoffzwischenlage!

Drahtseile mit einer Kunststoffzwischenlage sind erheblich widerstandsfähiger gegen die Lockerung von Einzellitzen und gegen Korbbildungen als Drahtseile anderer Macharten.

8.5 Lösung 5: Vermeiden Sie zu enge Seilrillen!

Litzenlockerungen und Korbbildungen können auch durch zu enge Rillen verursacht werden. Wenn der Rillenradius zu klein ist (Bild 43), wird das Drahtseil beim Auflaufen auf die Seilscheibe oder die Seiltrommel komprimiert werden. Anschließend werden die Aussenlitzen für den verringerten Seildurchmesser zu lang sein, und die überflüssige Litzenlänge wird zu einem Punkt hin verschoben werden. An dieser Stelle (üblicherweise ist dies der Endpunkt der Bewegung) werden wir schließlich Litzenlockerungen oder eine Korbbildung vorfinden.

Die Seilrille sollte einen Radius von 0,53 bis 0,54 mal Seilnenndurchmesser besitzen. Wenn der Rillenradius kleiner ist, sollte die Seilscheibe oder Seiltrommel nachgearbeitet oder ersetzt werden. Wenn dies nicht möglich ist, sollte ein Seil mit gleicher Bruchkraft, aber geringerem Seilnenndurchmesser eingesetzt werden, für das die geforderten Bedingungen dann wieder gelten.

9 Problem: Mechanische Beschädigung der Drahtseile auf der Seiltrommel

Drahtseile werden häufig auf der Trommel mechanisch beschädigt. Unter dem Einfluß eines Ablenkwinkels kann das auf- oder ablaufende Drahtseil beispielsweise gegen eine Nachbarwindung gezogen werden (Bild 44). Hierbei können die Außendrähte an den Berührungspunkten beschädigt werden.

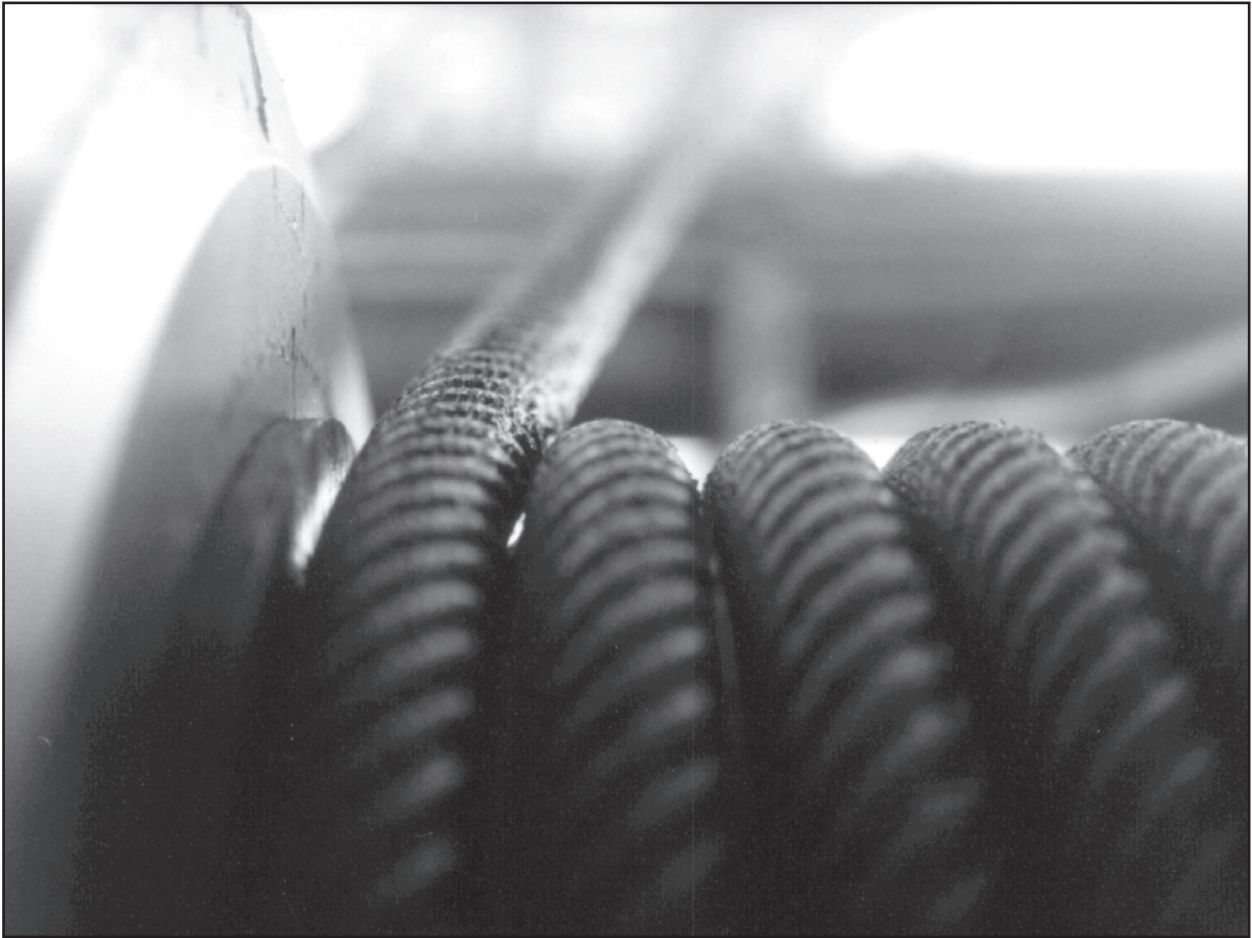


Bild 44: *Unter dem Einfluß eines Ablenkwinkels wird das Drahtseil gegen seine Nachbarwindung gezogen. Die Außendrähte werden an der Berührungsstelle beschädigt.*

9.1 Lösung 1: Gerillte Seiltrommeln und eine Lebus-Spulung

Gerillte Seiltrommeln sollten gegenüber ungerillten Trommeln bevorzugt werden. Bei Mehrlagenspulung sollte das Lebus-Spulsystem benutzt werden.

9.2 Lösung 2: Drahtseile in Gleichschlagausführung mit verdichteten Außenlitzen

Die Außendrähte zweier benachbarter Seilwindungen eines Kreuzschlagseiles können sich ineinander verzahnen (Bild 45), weil sie an der Seiloberfläche in Richtung der Seilachse liegen. Wenn eine der beiden Windungen sich in einer Abwärtsbewegung in die Trommel hineinlegt oder in einer Aufwärtsbewegung die Trommel verläßt, werden die verzahnten Außendrähte einander beschädigen.

Wenn Gleichschlagseile verwendet werden, können sich die Außendrähte zweier Nachbarwindungen nicht ineinander verzahnen, weil sie in der Berührungsstelle an

der Seiloberfläche auf der einen Seite aufwärts und auf der anderen Seite abwärts gerichtet liegen. Deshalb werden sich die Außendrähte von Gleichschlagseilen gegenseitig beim Auf- und Abspulen erheblich weniger beschädigen.

Verdichtete Außenlitzen zeigen weitere Vorteile (Bild 46): Die Berge und Täler der Außendrähte sind abgeflacht und geglättet. Zudem weisen die Außendrähte einen erheblich höheren Metallquerschnitt auf und besitzen somit einen vergrößerten Widerstand gegen Abrieb und mechanische Beschädigung.

Für Trommeln mit Mehrlagenbewicklung sollten lediglich Drahtseile in Gleichschlagsausführung mit verdichteten Aussenlitzen verwendet werden.

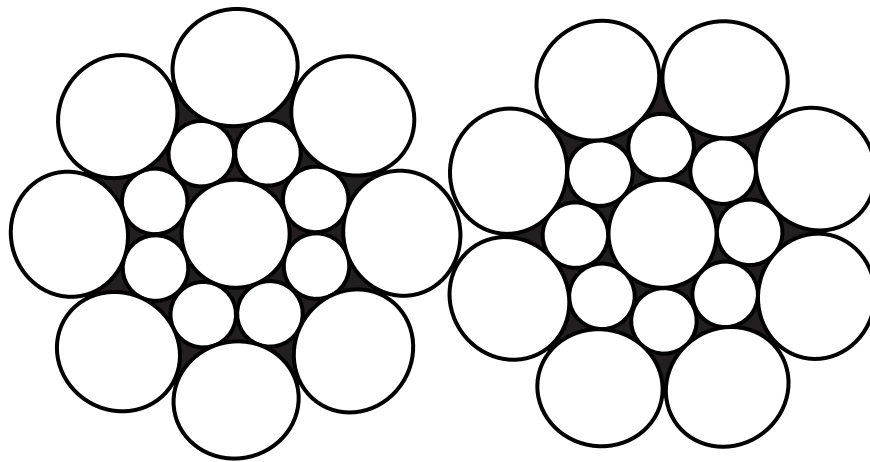


Bild 45: *Die Außendrähte zweier benachbarter Windungen eines Kreuzschlagseils können sich ineinander verzahnen.*

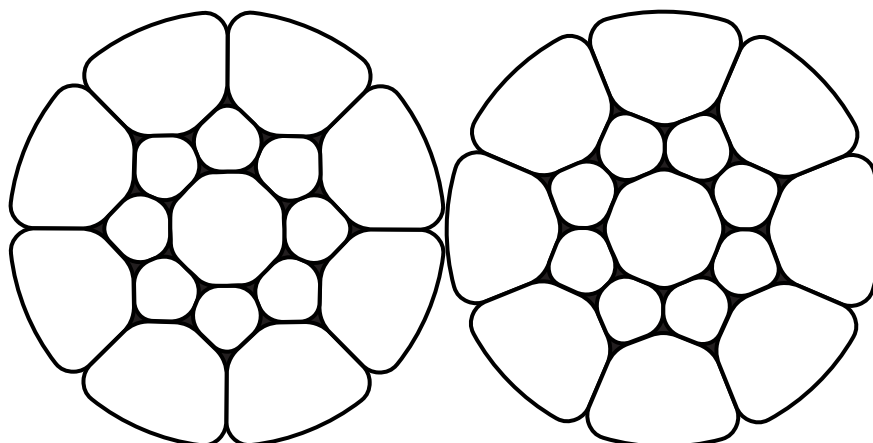


Bild 46: *Die Berge und Täler verdichteter Außenlitzen sind abgeflacht und geglättet. Der Metallquerschnitt ist erhöht, um Abrieb und mechanischer Beschädigung besser zu widerstehen.*

10 Problem: Gute Drahtseile sind teuer.

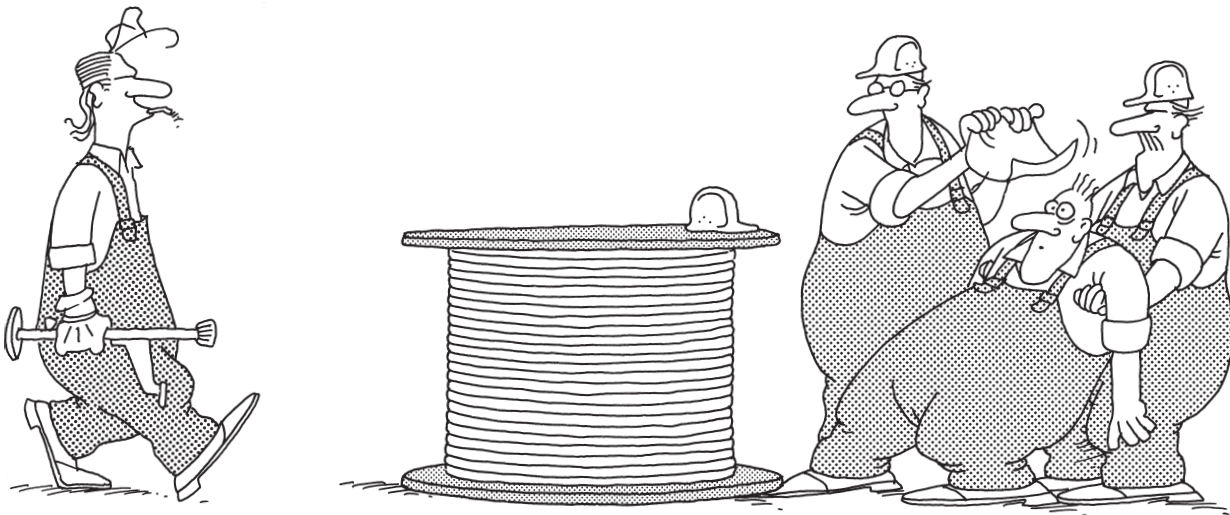
Hochwertige Drahtseile sind teurer als konventionelle 08/15-Konstruktionen.

10.1 Lösung: Berechnen Sie die Gesamtkosten!

Schlechte Seile sind billiger als gute Seile. Aber nach einer gewissen Zeit werden Sie feststellen, dass Sie *drei* schlechte Seile gekauft haben, wo *ein* gutes genügt hätte.

Der Transport eines *schlechten* Seiles zur Baustelle kostet soviel wie der Transport eines *guten* Seiles, und die Montage eines *schlechten* Seiles kostet so viel wie die Montage eines *guten* Seiles. Nur dass diese Kosten bei Verwendung schlechter Seile eventuell *dreimal so oft* anfallen wie bei Verwendung von guten Spezialdrahtseilen.

Sie sparen eine Menge Geld, wenn Sie direkt ein hochwertiges Produkt kaufen. Für Drahtseile gilt das noch mehr als für jedes andere Maschinenelement.



Für jedes Seilproblem gibt es eine Lösung: Rufen Sie uns an!

Der Autor: Dipl.-Ing. Roland Verreet

Wire Rope Technology Aachen • Grünenthaler Str. 40 a • D - 52072 Aachen
Tel. + 49 (241) 173147 • Fax + 49 (241) 12982 • e-mail: R.Verreet@t-online.de

© 2001 PR GmbH, Aachen. Erste Auflage Januar 2002. Layout und Satz: PR GmbH, Aachen. Cartoons: Rolf Bunse, PR GmbH. Nachdruck, auch teilweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des Autors.